

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA  
FAKULTA STROJNÍ  
KATEDRA ENERGETIKY



Návrh kompenzátoru objemu pro jadernou  
elektrárnu AP 1000 Westinghouse

Proposal of Pressurizer for Nuclear Power Plant AP  
1000 Westinghouse

Vedoucí diplomové práce:

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Student:

Petr Zapletal

OSTRAVA 2012

## Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Petr Zapletal**  
Studijní program: N2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2302T006 Energetické stroje a zařízení  
Téma: **Návrh kompenzátoru objemu pro jadernou elektrárnu AP 1000 Westinghouse**  
**Proposal of Pressurizer for Nuclear Power Plant AP 1000 Westinghouse**

### Zásady pro vypracování:

Navrhnete konstrukční řešení kompenzátoru objemu pro jadernou elektrárnu AP 1000 Westinghouse, která se zúčastní konkurzu na dostavbu Temelína.

Proved'te základní tepelné a hydraulické výpočty s návrhem elektroohříváčů. Navrhnete simulační model a řešte vybrané přechodové stavy.

### Zadané parametry:

Tepelný výkon jaderné elektrárny 3415 MWt; elektrický výkon 1117 MWe;  
teplota chladiva v I. okruhu 280,7 / 321,1 °C; tlak v I. okruhu 15,5 MPa;  
objem kompenzátoru objemu 59,5 m<sup>3</sup>; parní objem 31,1 m<sup>3</sup>;  
výpočtový tlak a teplota 17,1 MPa / 360 °C; celková konstrukční výška 16,3 m;  
vnitřní průměr 2,28 m; elektrický výkon ohříváčů 1600 kWe.

### Seznam doporučené odborné literatury:

HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1 a 2. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6.

MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.

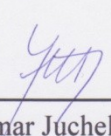
HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185 s. ISBN 80-01-03324-4.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

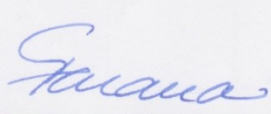
Vedoucí diplomové práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 16.12.2011

Datum odevzdání: 21.05.2012

  
prof. Ing. Dagmar Juchelková, Ph.D.  
vedoucí katedry




  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

## **Prohlášení studenta**

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 16.5. 2012

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Petr Zapletal', is written over a dotted line.

podpis diplomanta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі́, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že diplomová práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího diplomové práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užití díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požádat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі́, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne: 16. 5. 2012



.....  
podpis diplomanta

Jméno a příjmení autora práce: Petr Zapletal

Adresa trvalého pobytu autora práce: Sušilova 25, Hodonín, 695 01

### **Poděkování:**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat Prof. Ing. Pavlu Kolátovi, DrSc. za mé vedení při zpracování diplomové práce, rovněž také za poskytnuté informace a čas, který mi věnoval.

## **ANOTACE DIPLOMOVÉ PRÁCE**

ZAPLETAL, P. *Návrh kompenzátoru objemu pro jadernou elektrárnu AP 1000 Westinghouse: diplomová práce.* Ostrava : VŠB – Technická universita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra energetiky, 2012, 72 s. Vedoucí práce: Kolát, P.

Diplomová práce se zabývá návrhem kompenzátoru objemu pro projekt AP1000 Westinghouse. První částí představuje společnost Westinghouse a popisuje projekt AP1000 s jeho inovativními prvky. Další část se věnuje pasivní bezpečnosti projektu AP1000 a systému odvodu zbytkového tepla po havárii jaderné elektrárny. Následně je popsán kompenzátor objemu a představeny jsou jeho funkce. Uveden je základní tepelný výpočet a navrženy jsou funkce sprchového systému a systému elektroohříváků. Je zde popsán a navrhnut matematický model pro řešení přechodových vztahů, jejichž rozбором a výsledky se zabývá další kapitola. Příloha uvádí výkresovou dokumentaci kompenzátoru objemu.

## **ANNOTATION OF DIPLOMA THESIS**

ZAPLETAL, P. *Proposal of Pressurizer for Nuclear Power Plant AP 1000 Westinghouse : Diploma Thesis.* Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical engineering, Department of Energetics, 2012, 72 p. Thesis head: Kolát, P.

Thesis deals with the concept of the pressurizer for the AP1000 Westinghouse project. The first part presents the Westinghouse AP1000 project and describes its innovatory components. The next part puts attention to the passive safety of the AP1000 project. It is also concerned with the residual heat removal system after the possible accident of the nuclear power plant. The pressurizer and its functions are introduced afterwards. The fundamental calculation of the heat processes is specified. The functions of the shower and electroheater systems are suggested. The mathematical model of the transitional relations resolution is described and designed. The analysis and the results are included in the next chapter. The attachment contains the graphical documentation of the pressurizer.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

- kompenzátor objemu
- zbytkové teplo
- Westinghouse
- AP1000

## **KEYWORDS**

- Pressurizer
- Residual heat
- Westinghouse
- AP1000



## Obsah

1.	Úvod.....	11
2.	Společnost Westinghouse .....	12
3.	Profil elektrárny Westinghouse AP1000 .....	15
4.	Bezpečnostní systémy AP1000 Westinghouse .....	18
4.1.	Aktivní bezpečnostní systémy.....	19
4.2.	Pasivní bezpečnostní systémy .....	20
4.2.1.	Pasivní systém chlazení aktivní zóny .....	20
4.2.2.	Hermetičnost kontejmentu .....	20
4.2.3.	Pasivní systém chlazení kontejmentu .....	21
5.	Řešení těžkých havárií: .....	22
5.1.	Havárie typu tavení aktivní zóny .....	22
5.2.	Havárie typu LOCA (loss of coolant accident).....	23
5.2.1.	Kompenzátor objemu.....	23
5.2.2.	CMT (vysokotlaké doplňování).....	23
5.2.3.	Odvod zbytkového tepla .....	23
5.2.4.	Čtyřstupňové odtlakování systému .....	24
5.2.5.	Hydroakumulátory (středotlaké doplňování).....	24
5.2.6.	IRWST (nízkotlaké doplňování).....	25
6.	Kompenzátor objemu.....	26
6.1.	Regulace hladiny v kompenzátoru objemu .....	27
6.2.	Systém výměny a doplňování chladiva do primárního okruhu.....	27
6.2.1.	Vodovýměna .....	27
6.3.	Charakteristika kompenzátoru objemu .....	28
6.3.1.	Určení součinitelů přestupu tepla v kompenzátoru objemu.....	28
6.3.2.	Určení součinitele přestupu tepla mezi vodou a stěnou.....	28
6.3.3.	Určení součinitele přestupu tepla mezi párou a stěnou.....	29
6.3.4.	Součinitel přestupu tepla mezi párou a vodou: .....	29
6.4.	Návrh sprchového systému .....	30
6.5.	Návrh elektroohříváčů.....	33
7.	Návrh matematického modelu kompenzátoru objemu .....	39
7.1.	Řešení matematického modelu .....	39
7.2.	Vývojový diagram matematického modelu .....	46
7.3.	Výpis části matematického modelu navrženého v programu MATLAB: .....	47
8.	Výsledky vybraných přechodových stavů .....	55

8.1	Odstavení čtyř hlavních cirkulačních čerpadel s požadavkem na samocirkulaci	55
8.2	Uzavření ventilu turbogenerátoru .....	57
8.3	Simulace netěsnosti v primárním a sekundárním okruhu .....	59
9	Hodnoty pro vybrané přechodové stavy: .....	62
9.1	Odstavení čtyř hlavních cirkulačních čerpadel s požadavkem na samocirkulaci	62
9.2	Uzavření ventilu turbogenerátoru .....	64
9.3	Simulace netěsnosti v primárním a sekundárním okruhu .....	67
11.	Seznam použité literatury: .....	71
	Seznam příloh: .....	72



Seznam použitého značení:

Symbol	Jednotka	Veličina
$C_p$	$\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	měrná tepelná kapacita
$p$	MPa	tlak
$V_1$	$\text{m}^3$	objem vody
$V_2$	$\text{m}^3$	objem páry
$\alpha$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$	součinitel přestupu tepla
$x$	-	suchost kapaliny
$d$	m	průměr kompenzátoru objemu
$t$	$^{\circ}\text{C}$	teplota
$\lambda$	$\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	tepelná vodivost
$\nu$	$\text{Pa}^{-1}$	dynamická viskozita
$\tau$	S	čas
$\dot{m}$	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	hmotnostní tok
$C_s$	$\text{kJ} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$	tepelná kapacita KO
$i$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	entalpie
$m$	kg	hmotnost
$S$	$\text{m}^2$	plocha
$T_s$	$^{\circ}\text{C}$	teplota stěny
$v$	$\text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	měrný objem
$P$	kW	tepelný výkon
$L$	m	výška hladiny
$Q_{vp}$	$\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$	průtočný objem
$\delta$	m	tloušťka kondenzátu
$a$	mm	šířka
$I$	A	proud
$L$	mm	délka topného tělesa
$l$	mm	délka topného odporu
$n$	-	počet elektrických ohříváků
$Q$	W	výkon
$R$	$\Omega$	odpor
$U$	V	napětí

Seznam použitých symbolů:

e	elektroohříváč
N	nominální
s	střední hodnota
k	kondenzát ze stěn
v, 1	voda
p, 2	pára
I	primární
II	sekundární
j	jednotková hodnota
'	sytá kapalina
''	sytá pára
dp	odpor vlivem poklesu tlaku
e	odpar elektroohříváků
h	kondenzát na hladině
ch	kondenzát na sprchových kapkách
lam	laminární
o	odpar ze stěny
p	primární chladivo
p-s	rozhraní pára - stěna
p-v	rozhraní pára - voda
st-up	stěna u páry
st-uv	stěna u vody
t	tangenciální
H	hladina

## 1. Úvod

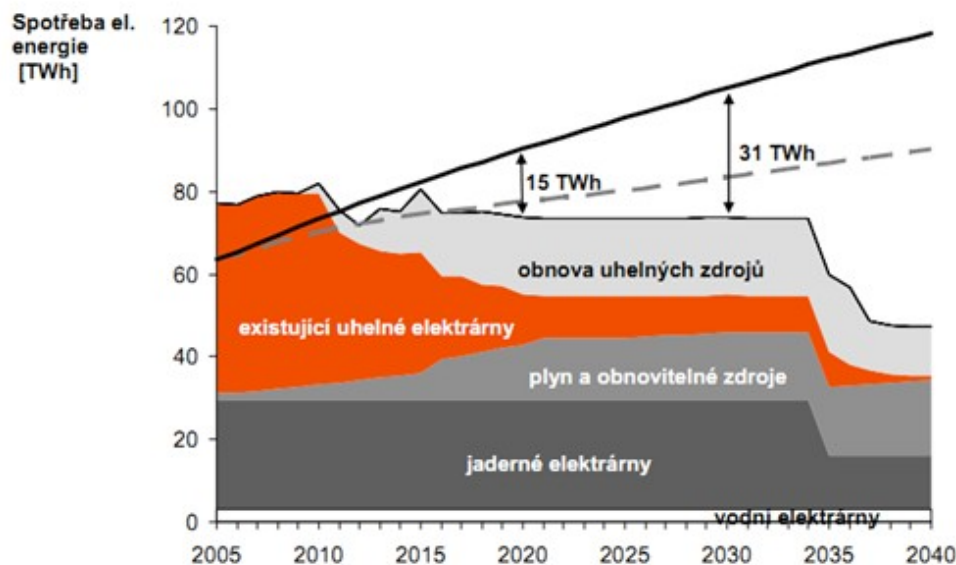
Život bez energie je pro dnešního člověka téměř nepředstavitelný. Lidé dnes využívají ke svým potřebám přes 450 GJ energie ročně. Každý rok na naší planetě dochází k nezanedbatelnému přírůstku celkové roční spotřeby energie. Lidé nekontrolovatelně využívají všech dostupných zdrojů: uhlí, ropy, zemního plynu.

Jaderná energie se v současné době používá v největší míře jako zdroj elektrické energie, v dopravě a výzkumných ústavech (výzkumné reaktory). Díky využití štěpení těžkých jader můžeme v oblasti výroby elektrické energie dosáhnout výrazného snížení škodlivých emisí na naší planetu. Nejvíce se podílí na snižování produkce CO<sub>2</sub>, který ve velké míře ovlivňuje skleníkový efekt. Pro rok 2011 byla stanovena celosvětová hodnota produkce CO<sub>2</sub> na 22 700 Mt. Díky využití štěpných reakcí ale můžeme tuto hodnotu snížit o více než 700 Mt ročně. Dále využití jaderné energie přispívá ještě k dalšímu snížení emisí a to zejména těžkých kovů, oxidu siřičitého a oxidu dusíku.

Nespornou výhodou v jaderné energetice je dopravované množství paliva, které má mnohonásobně menší objem než jiné pevné látky. Uran má také strategický význam pro českou elektroenergetiku. Díky velkým zásobám u nás i v tuzemsku činí stát nezávislým na dodávkách surovin výhradně z jedné krajiny. Výrobou uranu se zabývá více firem, mezi nimiž existuje konkurence, která udržuje ceny uranu na nízké úrovni. Zásoby uranu ve světě jsou velké. Podle nejnovějších odhadů nám může elektrická energie z uranu sloužit i stovky let. To nám dává, vzhledem k zásobám fosilních paliv, velkou šanci najít nový zdroj energie nebo se naučit využívat termojaderné reakce, pro které máme zásoby paliva téměř nevyčerpatelné.

Česká Republika má v současné době dost energie pro pokrytí vlastní spotřeby. Graf č.1.1 nám ukazuje odhad možné spotřeby elektrické energie v následujících letech. V tomto grafu není zahrnuta předpokládaná dostavba třetího a čtvrtého bloku elektrárny Temelín. Z grafu je možno vyčíst že už v roce 2020 bude mít ČR nedostatek elektrické energie v hodnotě asi 15 TWh a tento deficit bude neustále stoupat. Citelný nárůst očekáváme na začátku roku 2035, kdy se začne odstavovat jaderná elektrárna Dukovany. Tuto deficitní elektrickou energii pak bude muset ČR nakupovat od okolních států. Díky tomuto faktu se jaderná elektřina i přes negativa, jako je bezpečnost a stále

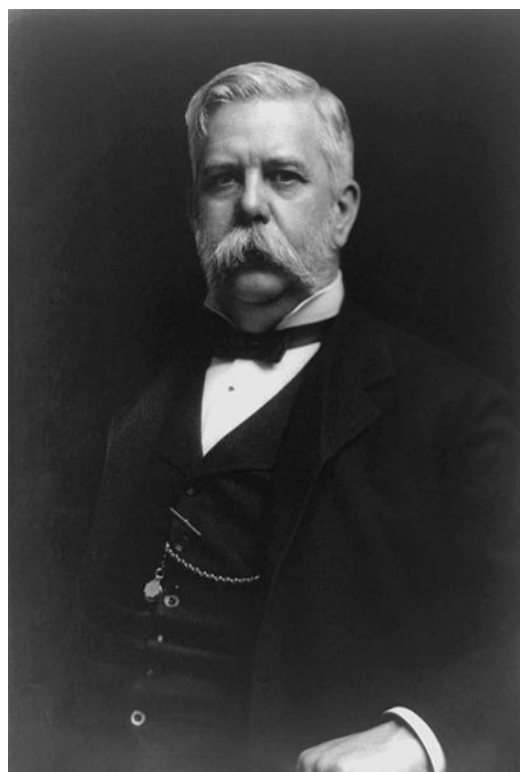
nevyřešený konec palivového cyklu – likvidace vyhořelého paliva, stává novým zdrojem elektrické energie.



Obr.1.1 Očekávaná dodávka českých zdrojů vs. Vývoj spotřeby v TWh. [1]

## 2. Společnost Westinghouse

V roce 1886 založil George Westinghouse (6. 10. 1846 - 12. 3. 1914) společnost Westinghouse Electric Company. Velký rozmach firma zaznamenala začátkem devadesátých let devatenáctého století, kdy začala realizovat rozvody střídavého proudu, které převládly nad Edisonovým stejnosměrným systémem.



Obr. 2.1 George Westinghouse [2]

Společnost Westinghouse vybudovala téměř 50% elektráren po celém světě a téměř 60% ve Spojených Státech. Nyní společnost čítá asi 8500 zaměstnanců. Společnost se zabývá třemi hlavními odvětvími:

- Jaderné palivo
- Jaderné elektrárny
- Jaderná automatizace a servis

„Dne 30.1.2012 společnost podepsala memorandum o porozumění s českou společností Metrostav a.s. v rámci přípravy na potenciální výstavbu jaderné elektrárny AP1000 v České republice.

Na základě této dohody budou Westinghouse a Metrostav exkluzivně spolupracovat na přípravě nabídky pro dostavbu temelínské elektrárny s využitím technologie reaktoru AP1000. Memorandum zahrnuje klíčové aspekty projektu a realizace stavební části nových temelínských bloků.

Dohoda představuje další z milníků v aktivitách Westinghouse směřujících k vytvoření kvalitní nabídky pro společnost ČEZ v rámci jejího výběrového řízení. Navazuje na předešlou exkluzivní dohodu s českou firmou I & C Energo a neexkluzivní memorandum o porozumění s další českou společností Vítkovice a.s.

Při podpisu dohody Yves Brachet, prezident Westinghouse pro Evropu, Blízký Východ a Afriku, řekl:

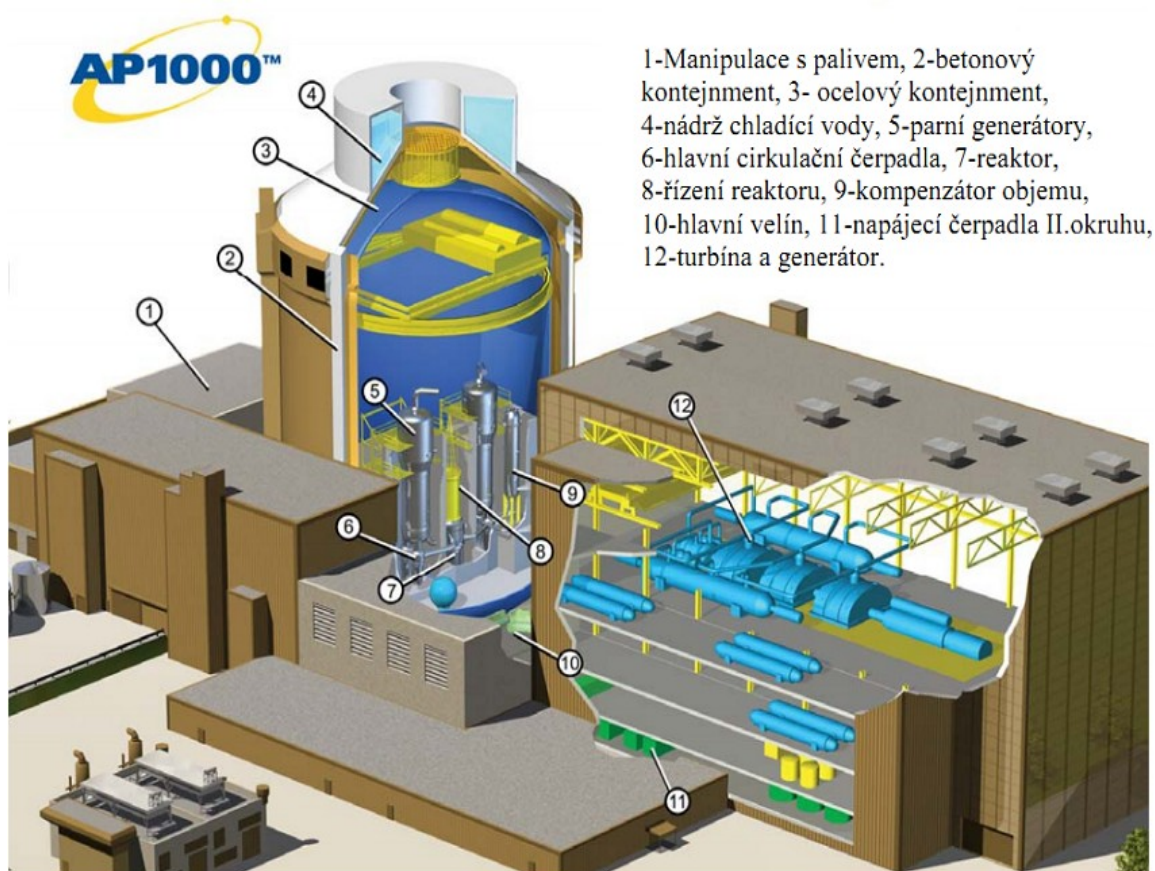
„Přestože česká vláda a ČEZ deklarovali, že lokalizace dodávek nemůže být kritériem pro výběr technologie ve výběrovém řízení z důvodu dodržení českých a evropských zákonů, lokalizace je nedílnou součástí naší nabídky. Jednáme v souladu s naší politikou “Nakupujeme tam, kde stavíme” a dnešní dohoda je dalším důkazem této politiky v praxi.“

Americká jaderná regulační komise udělila 22. prosince 2011 Westinghouse finální licenci pro projekt AP1000. Týden předtím britské regulační orgány reaktor schválily předběžně. AP1000 je jedním ze dvou projektů, které jsou momentálně vybírány pro potenciální výstavbu nových jaderných elektráren ve Velké Británii. Celosvětově bylo na dodávky AP1000 uzavřeno deset kontraktů – čtyři v Číně a šest ve Spojených státech. Všechny čtyři projekty v Číně jsou již rozestavěny a pokračují podle plánu. První blok v čínském Sanmenu začne vyrábět elektřinu v roce 2013.“ [4]

Pokračujícího výběrového řízení společnosti ČEZ a.s. na dodavatele pro dokončení jaderné elektrárny Temelín se účastní společnosti Westinghouse Electric Company LLC a Westinghouse Electric Czech Republic.

V tomto tendru nabízí společnost Westinghouse svůj tlakovodní reaktor AP1000 generace III+, který dokáže využívat technologii pasivní bezpečnosti. Reaktor je licencován americkou jadernou komisí a vyhovuje i požadavkům EUR. [3], [5]

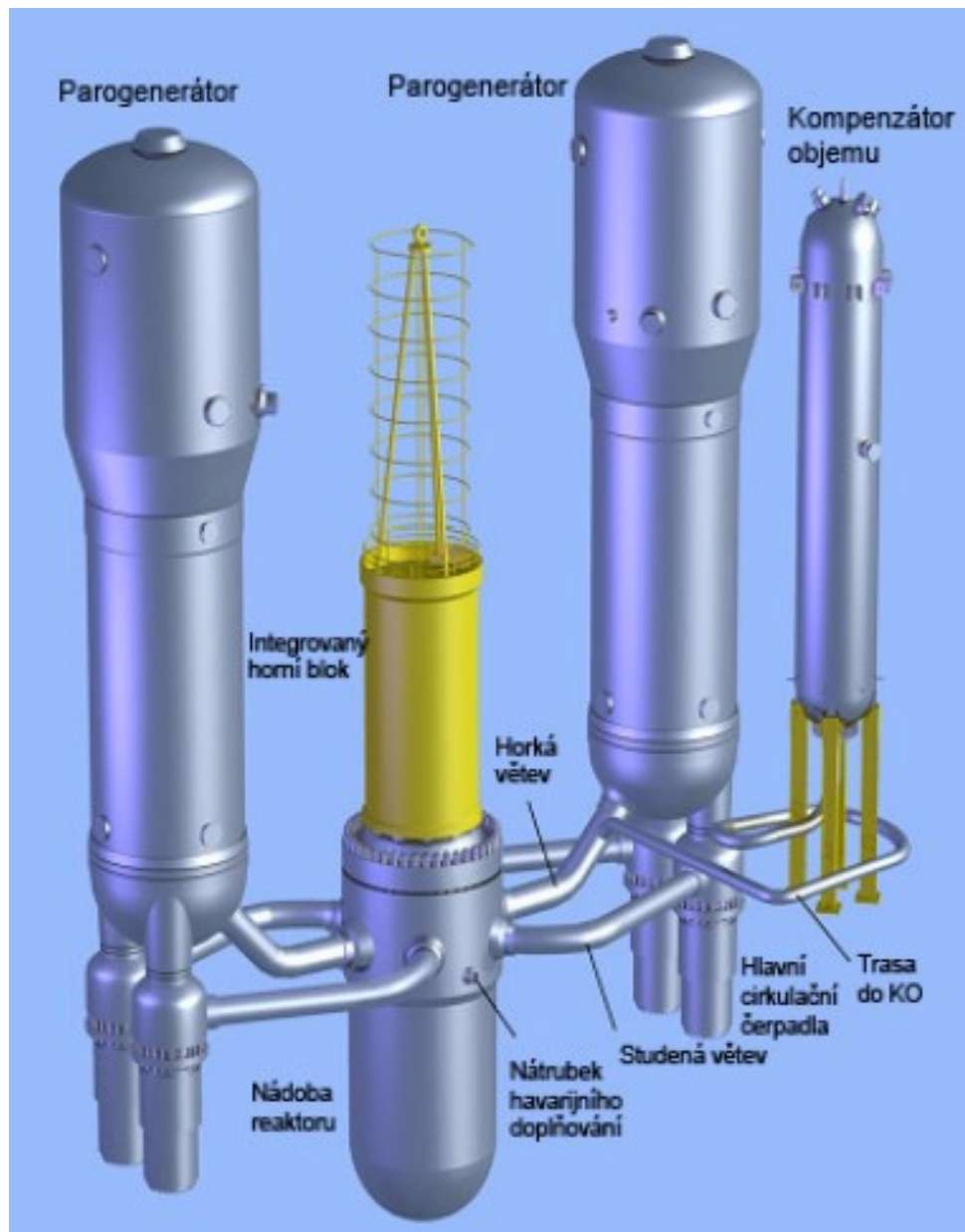
### 3. Profil elektrárny Westinghouse AP1000



[6], [7] Obr. 3.1 Koncepční uspořádání jaderné elektrárny AP1000 Westinghouse

Jaderná elektrárna AP1000 vyšla z mladšího a menšího modelu AP600, který byl postaven jako reaktor III. generace. Tyto elektrárny mají společné prvky, především zajišťující jejich bezpečnost. Naproti ostatním se vyznačují značným snížením počtu komponent celé elektrárny. Jako nejmarkantnější se jeví využití pouze dvou parogenerátorů ze standardních čtyř - Obr.3.2



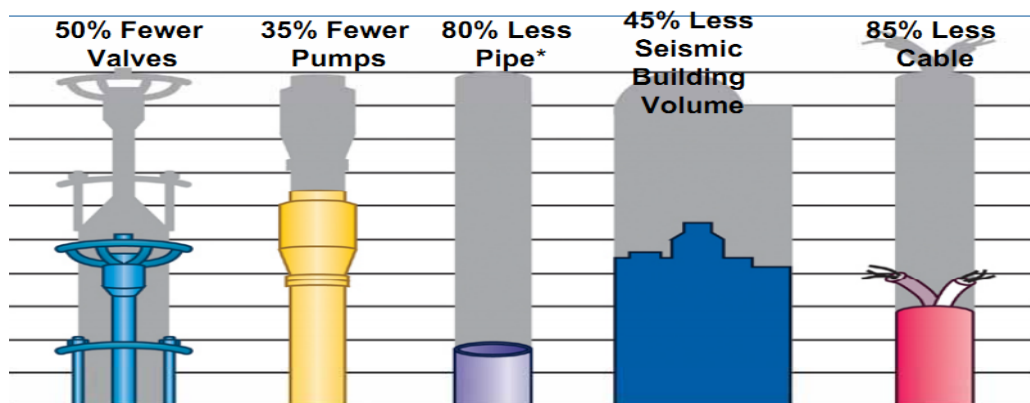


Obr. 3.2 Dvousmyčkové uspořádání I. okruhu jaderné elektrárny AP 1000 [8]

Další zjednodušení můžeme pozorovat u těchto komponentů:

- armatury
- potrubí
- čerpadla
- kabelový systém
- ventily

Obrázek 3.3 nám ukazuje snížení jednotlivých komponentů v procentech.



Obr. 3.3 Srovnání snížení počtu komponent u AP 1000 oproti PWR 1000 [9]

Jak je patrné z obrázku 3.3 jde o výrazné zjednodušení systémů primárního okruhu. Funkce bezpečnostních a provozních systémů je zde však zachována.

Technické údaje elektrárny nám shrnuje tabulka 3.4.

<b>Jaderná elektrárna</b>	
Instalovaný výkon	1117 MWe
Účinnost (čistá)	32,70%
Projektová životnost	60 let
<b>Reaktor</b>	
Tepelný výkon	3400 MWt
<b>Aktivní zóna</b>	
Palivo	obohacený uran v podobě UO <sub>2</sub> (palivo obsahuje vyhořívající absorbátor gadolinium)
Obhacení	4,95%
Počet palivových souborů	157
Počet regulačních tyčí	53
Počet absorpčních tyčí	16
Palivový cyklus	18 měsíců
<b>Systém chlazení reaktoru</b>	
Počet chladicích smyček	2
Pracovní tlak	17,2 MPa
Teplota chladiva na vstupu	281 °C
Teplota chladiva na výstupu	316 °C
Průtok chladiva reaktorem	19,8 m <sup>3</sup> /s
<b>Parogenerátor</b>	
Počet na výrobní blok	2
Odběr páry z 1 parogenerátoru	3397,4 t/hod
Tlak páry na výstupu	5,6 MPa
Teplota páry na výstupu	272 °C
<b>Kontejnment – vnitřní obálka</b>	
	- ocel
Průměr (vnitřní)	39,6 m
Tloušťka stěny	4,44 cm
Projektový tlak	0,407 MPa
<b>Kontejnment – vnější obálka</b>	
	- předepjatý beton
Výška	22 m
Průměr (vnitřní)	43 m
Tloušťka stěny	0,9 m (ve válcové části)
<b>Turbosoustrojí</b>	
Počet na výrobní blok	1
Počet dílů turbíny	1 vysokotlaký + 3 nízkotlaké
Otáčky	1500

Tab.: 3.4 základní parametry jaderné elektrárny AP1000 [10]

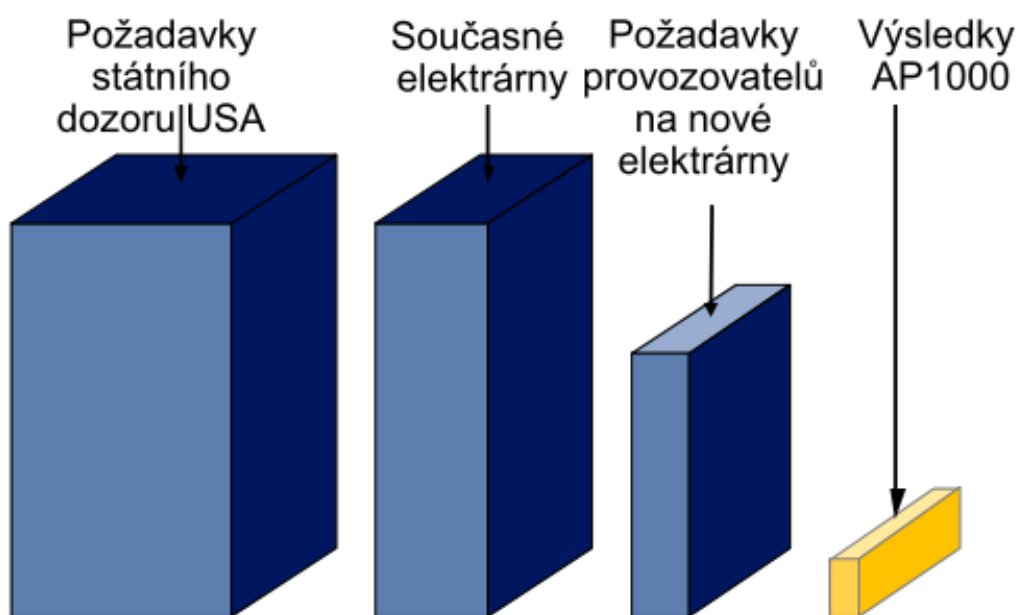
Jaderná elektrárna AP1000 je projektována na principu modulární konstrukce. Jednotlivé díly jsou vyrobeny zvlášť – celkem je asi 250 malých částí a 50 velkých. Tato koncepce má velké výhody:

- Díly jsou přivezeny zvlášť a jsou sestaveny za pomoci jeřábu až na místě.
- Díly jsou vyráběny zvlášť, proto můžeme současně zhotovit více dílů najednou.
- Krátká doba stavby jaderné elektrárny
- Jednotlivé díly (kromě reaktorové nádoby) můžeme vyměnit.
- Zaručená životnost 60 let
- Ekonomicky výhodnější provedení

[9], [10], [12], [13], [14]

#### 4. Bezpečnostní systémy AP1000 Westinghouse

Bezpečnost jaderné elektrárny AP1000 musí splňovat přísné normy mezinárodních organizací AIEA, EUR, US NRC. U projektu AP1000 je využito současných poznatků z provozu reaktorů AP600 a výzkumné činnosti.



Obr 4.1 Graf bezpečnostních rizik AP1000 [8]

AP1000 je asi stokrát bezpečnější než současné požadavky státního dozoru USA (NCR).

Bezpečnostní systémy rozdělujeme na 2 základní druhy:

- Aktivní bezpečnostní systémy
- Pasivní bezpečnostní systémy

#### **4.1. Aktivní bezpečnostní systémy**

Aktivní bezpečnostní systémy jsou určeny pro normální provoz. Ovládají je kvalifikovaní operátoři, kteří jich využívají nejčastěji k zajištění bezpečnosti při přechodových jevech.

Konstrukce těchto systémů je koncipována tak, že nepotřebují pravidelnou údržbu a testování. Kontroly nemusí být časté a jejich údržbu lze provádět i za provozu elektrárny.

Mezi hlavní aktivní bezpečnostní systémy řadíme:

- Systém normálního doplňování primárního okruhu
- Systém odvodu zbytkového tepla při normálním provozu
- Systém pro kontrolu obsahu vodíku v kontejmentu
- Pomocné systémy napájecí vody
- Absorpční tyče šedé a černé pro řízení reaktivity za normálního provozu
- Klimatizace, ventilace, vytápění

Pokud při havárii JE elektrická energie není k dispozici, můžeme tyto systémy napájet diesel–generátory (2x4 MW + 2x35 kW pro dobíjení akumulčních baterií) nebo akumulčními bateriemi. [9], [10], [12]

## **4.2. Pasivní bezpečnostní systémy**

Největší předností pasivních systémů je, že nejsou závislé na vnitřních a vnějších zdrojích elektrické energie, ani na činnostech člověka. Pravděpodobnost vzniku havárie je tím značně snížena, protože nemůže dojít k selhání člověka nebo k selhání funkce systému. Tyto systémy jsou založeny na přírodních silách (Pascalův zákon, cirkulace vzduchu, gravitace). Firma Westinghouse deklaruje, že jaderná elektrárna AP1000 při selhání člověka nepotřebuje zásah operátora v době až 72 hodin od vzniku havárie.

Mezi hlavní pasivní bezpečnostní systémy řadíme:

- Pasivní systém chlazení aktivní zóny.
- Hermetičnost kontejmentu.
- Pasivní systém chlazení kontejmentu.

### **4.2.1. Pasivní systém chlazení aktivní zóny**

Zastává dvě hlavní funkce

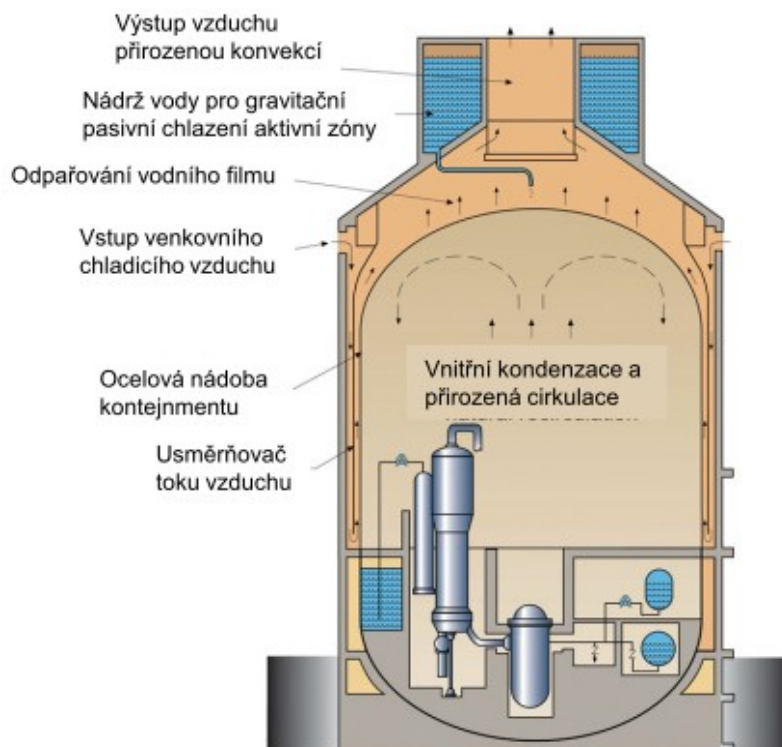
- bezpečné chlazení aktivní zóny
- zajištění odvodu zbytkového tepla z reaktoru

### **4.2.2. Hermetičnost kontejmentu**

Kontejment nesmí propustit produkty radioaktivního štěpení a ionizující záření. Je konstruován tak, aby nemohlo dojít k úniku ani plyných ani kapalných látek. Je konstruován pro přetlak 0,407 MPa a chlazení zajišťují pasivní bezpečnostní systémy. Díky těmto systémům došlo k výše uvedené asi 50 % redukci potrubí a ventilů, jež zajišťovaly chlazení a hermetičnost.

Při návrhu bezpečnosti kontejmentu byli zahrnuti veškeré vnější vlivy, které se nedají vyloučit – pád letadla, teroristický útok, zemětřesení, pád meteoritu, požár, tornádo, tajfun a jiné.

### 4.2.3. Pasivní systém chlazení kontejmentu



**Systém pasivního chlazení kontejmentu AP1000**

Obr. 4.2 Pasivní systém chlazení kontejmentu AP1000. [8]

Proti překročení tlaku a přehřátí slouží pasivní systém kontejmentu. Mezi ocelovým a železobetonovým pláštěm kontejmentu cirkuluje vzduch. Tento systém funguje i za běžného provozu.

Kromě toho systému je ještě u komína instalována nádrž pro gravitační sprchování ocelového pláště v případě těžké havárie. Když pomineme odvod tepla, je též primární funkcí těchto systémů snižovat tlak v kontejmentu, což je důležité pro zadržení škodlivých látek a ionizujícího záření. Systém sprchování je nastavený na nominální hodnotu přetlaku v kontejmentu kterou když překročí, otevře se voda, která je rozváděna gravitačním spádem na ocelový plášť. Objem této vody v nádrži by měl vydržet chladit kontejment tři dny, pokud nevyužijeme možnost dále doplňovat nádrž z externích zdrojů. Jestli by se ale voda v nádobě vyčerpala, vzroste v kontejmentu tlak jen na hodnotu 90 % tlaku projektovaného. Po těchto třech dnech je pasivní systém cirkulace vzduchu schopen uchládit ocelový plášť sám. [9], [10], [12], [13]

## 5. Řešení těžkých havárií:

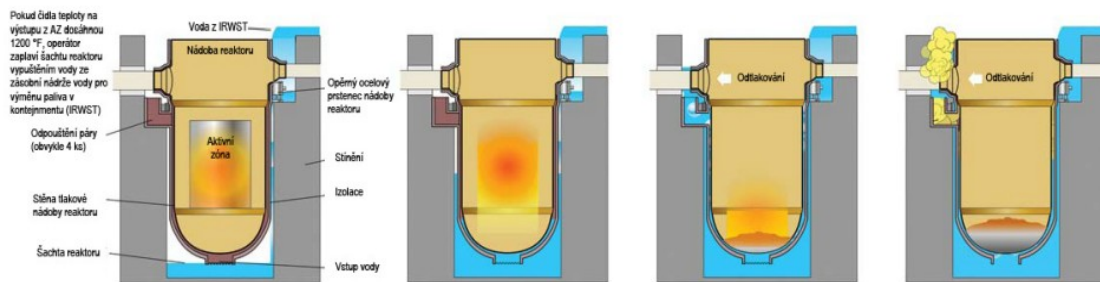
Jako nejtěžší havárie se u AP1000 považují:

- Havárie typu tavení aktivní zóny
- Havárie typu LOCA

### 5.1. Havárie typu tavení aktivní zóny

AP1000 nabízí zcela inovativní způsob v řešení problému tavení aktivní zóny. Princip spočívá v zachycení taveniny reaktorové nádoby s následným chlazením a zachycováním radioaktivních plynných látek do prostoru kontejmentu.

Princip tohoto systému nám ukazuje obrázek 5.1



Obrázek 5.1 Princip havárie tavení aktivní zóny [8]

K havárii tavení aktivní zóny dojde při teplotě od 649°C. Při této teplotě se otevrou armatury IRWST a vpustí chladivo do šachty reaktoru. Postupně se zaplní celá oblast kolem reaktoru. Pak chladivo dosáhne bodu, kdy vstupuje do tepelné izolace. Stoupá mezi stěnou izolace a obálkou reaktoru. Zahřívá se a vzniká pára, která stoupá do kontejmentu. Reaktor samotný je v této fázi taky zaplaven a dochází k chlazení přímo vody s taveninou. V případě, že je primární okruh neporušený, tak pára, která při tomto chlazení vzniká je odváděna do kompenzátoru objemu a po té do kontejmentu. Díky vnějšímu chlazení pak pára v kontejmentu kondenzuje a ten pak stéká zpět do IRWST. Systém chlazení je projektován tak, aby dokázal chladit nádobu natolik, aby aktivní zóna nepoškodila ocelový plášť reaktoru a neunikala do kontejmentu. Nemůže tedy nastat situace, kdy by aktivní zóna explodovala nebo k úniku radioaktivních látek a ionizujícího záření do životního prostředí. [8], [9], [10], [12], [13]



## **5.2. Havárie typu LOCA (loss of coolant accident)**

Pokud praskne větev v primárním okruhu, dochází k okamžitému poklesu tlaku v potrubí. Chladicí médium pak uniká z primárního okruhu a ten pak není dostatečně chlazen. Tento typ havárie označujeme LOCA (Loss of coolant accident.)

Princip řešení havárie LOCA můžeme rozdělit do těchto bodů:

### **5.2.1. Kompenzátor objemu**

Jestliže praskne potrubí v primárním okruhu, kompenzátor objemu se snaží vyrovnat chybějící množství a tlak chladiva. Tento tlak je vyvíjen za pomoci elektrických ohříváčů, které vytváří parní polštář nad hladinou chladiva v kompenzátoru. Kompenzátor objemu je připojen k horké větvi, která spojuje parogenerátor a reaktor.

### **5.2.2. CMT (vysokotlaké doplňování)**

Pokud nefungují žádné klasické způsoby chlazení aktivní zóny - Nefungují hlavní cirkulační čerpadla, hladina chladiva v kompenzátoru objemu klesla pod určitou úroveň, přichází na řadu CMT. Pro reaktor jsou konstruovány dva CMT systémy. Tyto systémy obsahují bórovou vodu ve stejném složení jako chladicí médium. Oba systémy jsou napojeny na potrubí pro doplňování přímo do reaktoru. Tento způsob označujeme DVI – direct vessel injection). CMT je pasivní systém, který funguje pouze na principu rozdílu tlaků, teplot a gravitačního spádu.

### **5.2.3. Odvod zbytkového tepla**

Jako doprovodný systém s CMT se spouští systém odvodu zbytkového tepla z aktivní zóny. Toto teplo se odvádí díky výměníku PRHR HX. Tento výměník je umístěn přímo v IRWST. Systém se aktivuje, pokud není zajištěn klasický odběr tepla v parogenerátorech. Teplá strana tohoto PRHR HX výměníku je stejně jako

kompenzátor objemu napojena na teplou větev primárního okruhu. Voda z kompenzátoru pak jde do tohoto výměníku, tady se ochladí a následně proudí do parogenerátoru. Armatury, kterými proudí, jsou pro normální chod elektrárny zavřené. Otvírají se až na základě signálu kontrolních a měřicích systémů, pokud jsou překročeny kritické parametry v primárním potrubí. Pro zajištění proudění média zde obdobně jako u systému CMT není zapotřebí elektrické energie. Médium zde proudí na základě rozdílu teplot a gravitačnímu spádu.

#### **5.2.4. Čtyřstupňové odtlakování systému**

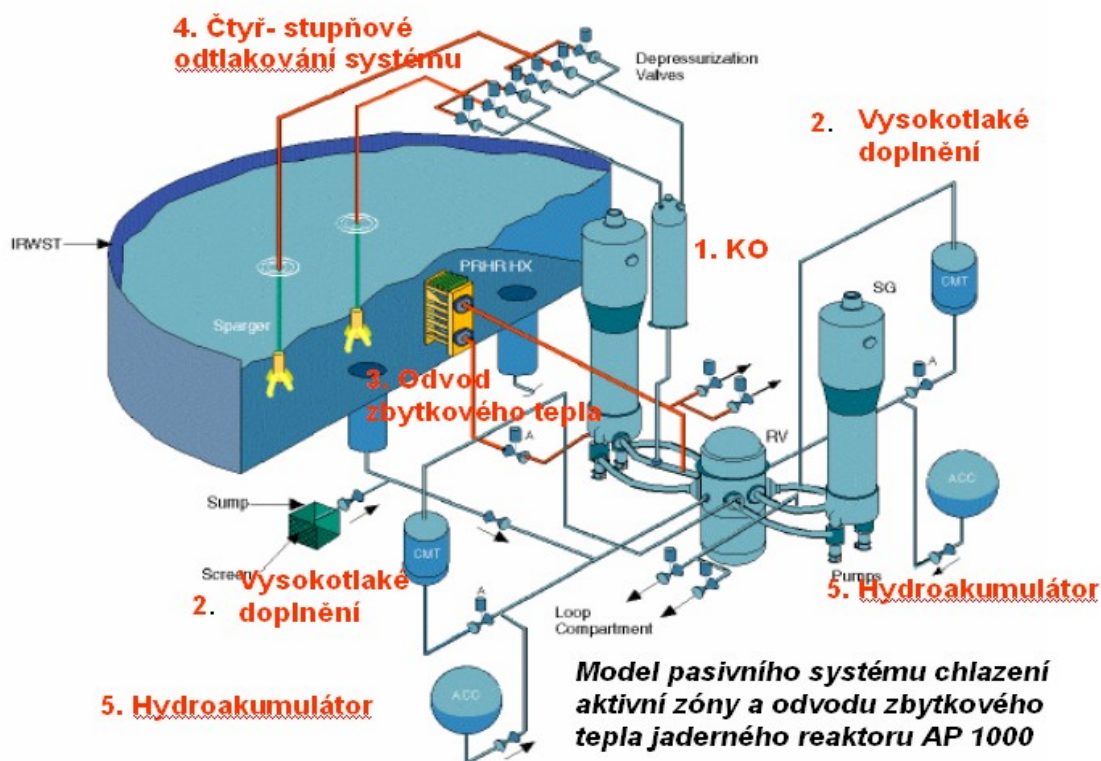
Pokud v CMT klesne hladina pod určitou úroveň, spustí se program čtyřstupňového odtlakování systému. Nejprve je aktivováno třístupňové snižování tlaku. Na kompenzátor objemu jsou napojena tři potrubí s třemi paralelně zapojenými armaturami. Toto potrubí ústí v IRWST. Armatury jsou zapojeny nad kompenzátozem objemu. V horké větvi PRHR HX je zapojen ještě čtvrtý stupeň odtlakování. Tento systém je aktivován, pokud hladina chladiva v CMT klesne na 20 % původního objemu. Je aktivován rozbuškou, přes tzv. rozbuškové ventily. Díky čtvrtému stupni je tlak snížen na tolik, že k chlazení aktivní zóny může dojít díky gravitačnímu spádu z IRWST. Potrubí je zakončeno ve volném prostoru kontejmentu. Díky tomuto systému můžeme zapojit další systémy, které pracují na nižším tlaku. Tento systém je částečně aktivní.

#### **5.2.5. Hydroakumulátory (středotlaké doplňování)**

Středotlaké doplňování pomocí hydroakumulátorů je aktivováno před aktivací čtvrtého stupně odtlakování. Tyto hydroakumulátory mají tlak 4,826 MPa. Obsahují plyn na bázi dusíku. Jsou připojeny k potrubí, které vede z CMT do reaktoru. Hydroakumulátory se spustí tehdy, pokud mezi CMT a reaktorem působením tlaku plynu dojde k otevření zpětných klapek. Po jejich otevření proudí chladivo přímo do reaktoru. Až nastane úplné vyčerpání chladiva z akumulátorů, pak teprve se aktivuje čtvrtý stupeň a systém chlazení pomocí IRWST.

### 5.2.6. IRWST (nízko tlaké doplňování)

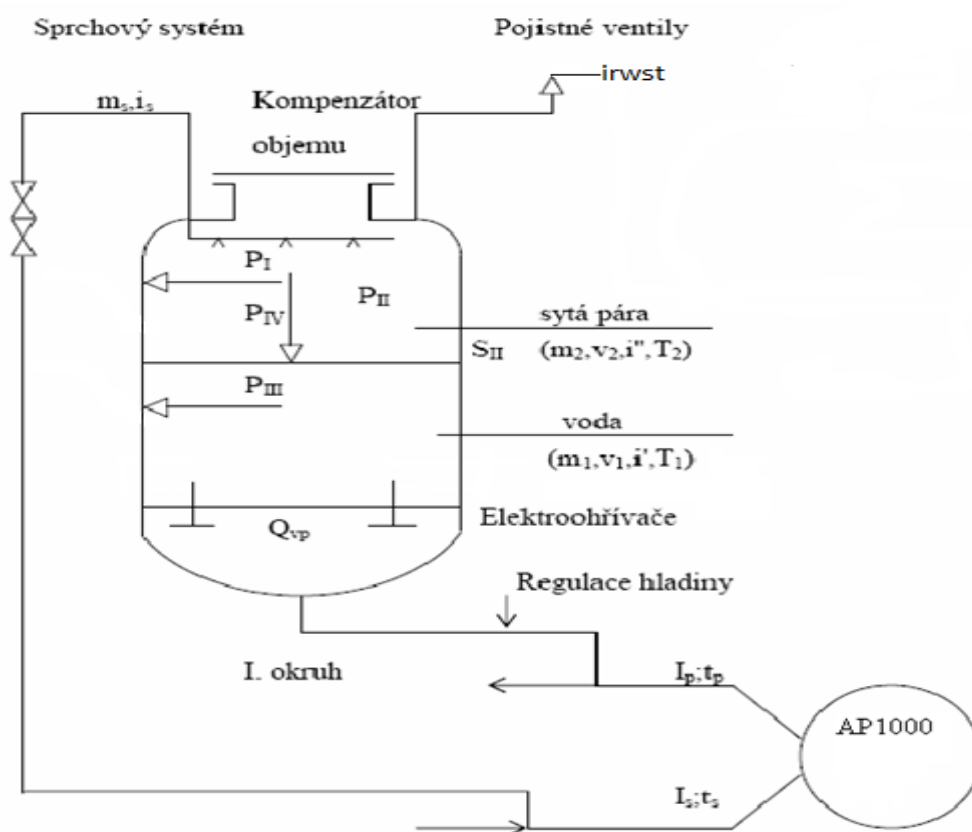
IRWST je umístěna v kontejmentu primárního okruhu. Je to nádrž, která se používá na výměnu paliva. Je umístěna nad havarijním systémem reaktorového chlazení i nad všemi smyčkami primárního okruhu. IRWST není tlaková nádoba. Tlak v této nádobě je pouze atmosférický. Z této nádoby je chladivo odebíráno teprve po vyčerpání chladiva z hydroakumulátorů. V této fázi je aktivován čtvrtý stupeň odtlakování systému. Pokud se tlak v potrubí blíží atmosférickému, začne chladicí médium proudit díky gravitaci do reaktoru. Potrubí, které vede z IRWST je připojeno k potrubní větvi vedoucí z CMT do jaderného reaktoru. Na potrubí IRWST je také vyústěn vývod vedoucí z kontejmentu, který slouží pro další doplňování chladiva do systému z vnějšího zdroje. Toto je poslední stupeň chlazení aktivní zóny. Část kontejmentu je zaplavena. Díky horké aktivní zóně se z chladiva stává pára, která se následně odpařuje do volného prostoru kontejmentu. V IRWST je PRHR HX, který vodu v nádrži zahřívá. Tato voda se pak vypařuje do kontejmentu, kde díky pasivnímu chlazení ocelové obálky kondenzuje a následně zase plní nádobu IRWST. Systém chlazení kontejmentu funguje za běžného provozu elektrárny i při všech výše popsaných haváriích. [9], [10], [12], [13]



Obr. 5.2 3D model pasivního systému chlazení aktivní zóny a odvodu zbytkového tepla jaderného reaktoru AP 1000 [15]

## 6. Kompenzátor objemu

Kompenzátor objemu slouží k udržování nominální hodnoty tlaku v primárním potrubí. Je to nádoba, v níž je voda a pára ve stavu sytosti (Při daném tlaku dosáhne bodu varu). V horní části nádoby je udržován parní polštář, který tlumí a vyrovnává rázy v primárním okruhu. Když dojde k menšímu snížení tlaku v primárním okruhu (např. snížením výkonu reaktoru, únikem vody z prim. okruhu), začne se voda v kompenzátoru odpařovat, protože teplota vody se zvýšila nad teplotu meze sytosti (snížil se tlak). Pára doplní parní prostor a v kompenzátoru nastane rovnováha. Pokud nastane větší úbytek tlaku v primárním okruhu, začnou vodu ve spodní části ohřívat elektrické ohříváky. Díky těmto ohřívákům se pak voda odpařuje intenzivněji a tím je možná rychlejší regulace tlaku. Pokud se naopak zvedne tlak v primárním okruhu (zvýšováním výkonu reaktoru), stává se pára podchlazenou a kondenzuje. Množství páry se zmenšuje a tlak v primárním okruhu klesá. Pokud je potřeba větší pokles tlaku, zapojí se sprchový systém kompenzátoru objemu. Do parní části je za pomoci sprch přiváděna relativně chladná voda ze studené větve chladicí smyčky. Pára je pak více chlazená a kondenzuje rychleji.



Obr. 6.1 Schéma kompenzátoru objemu

## **6.1. Regulace hladiny v kompenzátoru objemu**

Úbytek chladiva v primárním okruhu se projeví snížením hladiny kompenzátoru objemu. Toto chladivo musíme do kompenzátoru doplnit. K tomu nám slouží dva regulační ventily. První je na přívodním potrubí, druhý na odvodním. Pokud chceme doplnit chladivo, je třeba otevřít přívodní ventil a hladinu doplnit. Jestliže naopak hladina stoupá, odпустíme vodu z primárního okruhu odvodním ventilem. Při doplňování je důležité, aby nové chladivo mělo stejnou nebo větší koncentraci kyseliny borité jako ve vodě primárního okruhu, protože bychom zvyšovali výkon reaktoru.

## **6.2. Systém výměny a doplňování chladiva do primárního okruhu**

Při provozu jaderné elektrárny dochází k únikům chladicí vody. Tyto úniky mohou být jak plánované, tak neplánované. Mezi plánované můžeme zařadit například únik chladicí vody ucpávkami hlavních cirkulačních čerpadel. Mezi neplánované úniky chladicí vody z primárního okruhu nejčastěji patří netěsnosti u armatur ventilů. Tyto netěsnosti je třeba co nejrychleji lokalizovat a odstranit.

### **6.2.1. Vodovýměna**

Při vodovýměně je třeba nastavit stejný průtok jak na přívodní, tak na odvodní větvi. Stejně množství chladicí vody, které odvádíme tak také současně doplňujeme. Koncentraci kyseliny borité můžeme měnit. Buď ji ředíme, nebo zhušťujeme (pokud chceme změnit polohu regulačních tyčí v reaktoru). Odváděná voda je dále vedena do čistící stanice, kde se zbavuje nežádoucích příměsí a nečistot. Takto vyčištěná voda se pak může vrátit zpět do primárního okruhu.

### 6.3. Charakteristika kompenzátoru objemu

#### 6.3.1. Určení součinitelů přestupu tepla v kompenzátoru objemu

Uvnitř kompenzátoru objemu určujeme tepelné toky mezi párou a vodou, stěnou a vodou a párou a stěnou. Jako přenosové veličiny zde figurují součinitele přestupu tepla alfa.

#### 6.3.2. Určení součinitele přestupu tepla mezi vodou a stěnou

Pro kapalinu v kompenzátoru objemu můžou nastat dva případy:

Teplota kapaliny je menší než teplota varu. Přenos energie probíhá volnou konvekcí

Kapalina vře. Teplotní rozdíl ve styku se stěnou je malý, proto i tento případ uvažujeme jako volnou konvekci.

Pro volnou konvekci jsou v platnosti rovnice odvozené z teorie podobnosti:

$$Nu = c \cdot (Gr \cdot Pr)^n \quad (6.1.)$$

kde:

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\lambda} \quad Gr = \frac{g \cdot L^3}{\nu^2} \cdot \beta \cdot \delta t \quad Pr = \frac{\nu}{a}$$

$$\delta t = t_{st-uv} - t_1$$

Pokud uvažujeme nominální výšku hladiny  $L = 9 \text{ m}$  a ostatní fyzikální veličiny jsou:

$$\lambda = 0,338 \quad [\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}]$$

$$a = 9,17 \cdot 10^{-8} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$\nu = 0,127 \cdot 10^{-6} \quad [\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}]$$

$$Pr = 1,39$$

$$\beta = 53,4 \cdot 10^{-4} \quad \text{K}^{-1}$$

pak:

$$Gr \cdot Pr = \frac{9,81 \cdot 9^3 \cdot 53,4 \cdot 10^{-4}}{0,127 \cdot 10^{-6} \cdot 9,17 \cdot 10^{-8}} \cdot \delta t = 3,28 \cdot 10^{15} \cdot \delta t \geq 2 \cdot 10^7$$

z tabulek pak můžeme určit hodnoty pro  $c = 0,135$  a  $n=1/3$

Získáme pak výslednou rovnici ve tvaru:

$$\alpha_{v-s} = 0,135 \cdot \lambda \cdot \left[ \frac{g \cdot \beta}{\nu \cdot a} \cdot (t_1 - t_{st-uv}) \right]^{\frac{1}{3}} \quad (6.2)$$

### 6.3.3. Určení součinitele přestupu tepla mezi párou a stěnou

Přenos tepla mezi stěnou a párou závisí na teplotě stěny. Pokud je teplota stěny

$t_{st-up} > t''$  nastává přenos volnou konvekci. Jestli  $t_{st-up} < t''$  nastává blánová kondenzace páry na stěně.

Pro blánovou kondenzaci na stěně platí:

Výpočet Nusseltova kritéria pro svislou stěnu:

$$x_1 = \frac{\lambda}{\delta x} = \sqrt[4]{\frac{\rho_k^2 \cdot \lambda_k^3 \cdot g}{4 \cdot \eta_k \cdot (t' - t_{st-up}) \cdot x}} \quad (6.3)$$

kde tloušťku kondenzátu v místě  $x$  vypočteme:

$$\delta_x = \sqrt[4]{\frac{4 \cdot \lambda_k \cdot (t' - t_{st-up}) \cdot x}{\rho_k^2 \cdot g}} \quad (6.4)$$

Volnou konvekci vodní páry u stěny vypočteme podobně jako v kapitole 6.3.2, kde  $c$  a  $n$  parametr dostaneme ze závislosti součinu  $Gr \cdot Pr$ .

### 6.3.4. Součinitel přestupu tepla mezi párou a vodou:

Můžeme předpokládat, že součinitel přestupu tepla bude dosahovat vysokých hodnot při menších teplotních rozdílech na rozhraní, ale maximálně takových, aby voda



dokázala se svými vodivostními schopnostmi tento tok přijmout. Při výměně dochází navíc ke kondenzaci páry na hladině, čímž dostáváme jinou teplotu povrchové vrstvy kapaliny. Pro rozdíl teplot na rozhraní t platí  $t_1 < t < t_2$  – teplota se ustálí.

Pro určení součinitele můžeme použít empirický vztah:

$$\alpha_{p-v} = 2,77 \cdot 10^{-2} \cdot p^{0,58} \cdot (t_2 - t_1)^{2,33} \quad (6.5)$$

#### 6.4. Návrh sprchového systému

Pro výpočet předpokládáme maximální tlak 16,3 MPa, kdy dostáváme největší průtok sprchami  $m_s = 45$  kg/s. Elektroohříváče jsou vypnuté  $m_e = 0$ . Množství primárního chladiva odtékajícího z kompenzátoru objemu se rovná nule. ( $m_p + m_r = 0$ )

Změna množství vody:

$$m_1 = m_s + m_{ch} + m_k + m_h \quad (6.6)$$

Změna množství páry:

$$m_2 = -m_{ch} - m_k - m_h \quad (6.7)$$

Časová změna tlaku v KO:

$$p = \frac{m_2 \cdot v'' + m_1 \cdot v_1}{m_2 \cdot E_2} \quad (6.8)$$

$$E_2'' = \frac{v'' - v'}{i'' - 1} \cdot \left( \frac{di''}{dp} - v'' \right) - \frac{dv''}{dp}$$

Když dosadíme  $m_1$  a  $m_2$  do rovnice pro  $p$ , získáme algebraickými úpravami vztah pro výpočet průtoku sprchovým systémem.

$$m_s = \frac{\frac{p \cdot m_2 \cdot E_2''}{v'' - v_1} + m_k + m_h}{\frac{i' - i_s}{i'' - i'} + \frac{v_1}{v'' - v_1}} \quad (7.0)$$

Tepelný výkon, který přechází z páry do stěny, můžeme vypočítat jako:

$$P_{p-s} = \alpha_{p-s} \cdot S_p \cdot (T'' - T_{st-up}) = 0,3 \cdot 40 \cdot 3,1 = 37,2 \text{ kW} \quad (7.1)$$

Z něj pak vypočteme hmotový tok kondenzovaného chladiva ze stěn:

$$m_k = \frac{P_{p-s}}{i'' - i'} = \frac{37,2}{2573 - 1662} = 0,04 \text{ kg/s} \quad (7.2)$$

Při určení tepla, které přechází z páry do vody při kondenzaci, vycházíme ze vztahu:

$$P_{p-v} = \alpha_{p-v} \cdot S_H \cdot (T'' - T_1) = 100 \cdot 6,5 \cdot 0,2 = 130 \text{ kW} \quad (7.3)$$

Hmotový tok vzniklý kondenzací na hladině dostaneme ze vztahu:

$$m_h = \frac{P_{p-v}}{i'' - i} = \frac{130}{2573 - 1662} = 0,143 \text{ kW} \quad (7.4)$$

Vstupní údaje pro výpočet:

$T'' = 360$	$^{\circ}\text{C}$	$L = 9,2$	$\text{m}$
$T_{st-up} = 356,5$	$^{\circ}\text{C}$	$m_2 = 2658,1$	$\text{kg}$
$v'' = 0,009029$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$S_p = 40$	$\text{m}^2$
$v_1 = 0,001727$	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	$S_H = 6,424$	$\text{m}^2$
$i'' = 2573$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\alpha_{p-s} = 0,3$	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$i' = 1662$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\alpha_{p-v} = 100$	$\text{kW} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
$i_s = 1290$	$\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1}$	$E_2'' = 6,8256 \cdot 10^{-4}$	

Maximální průtok sprchovým systémem:

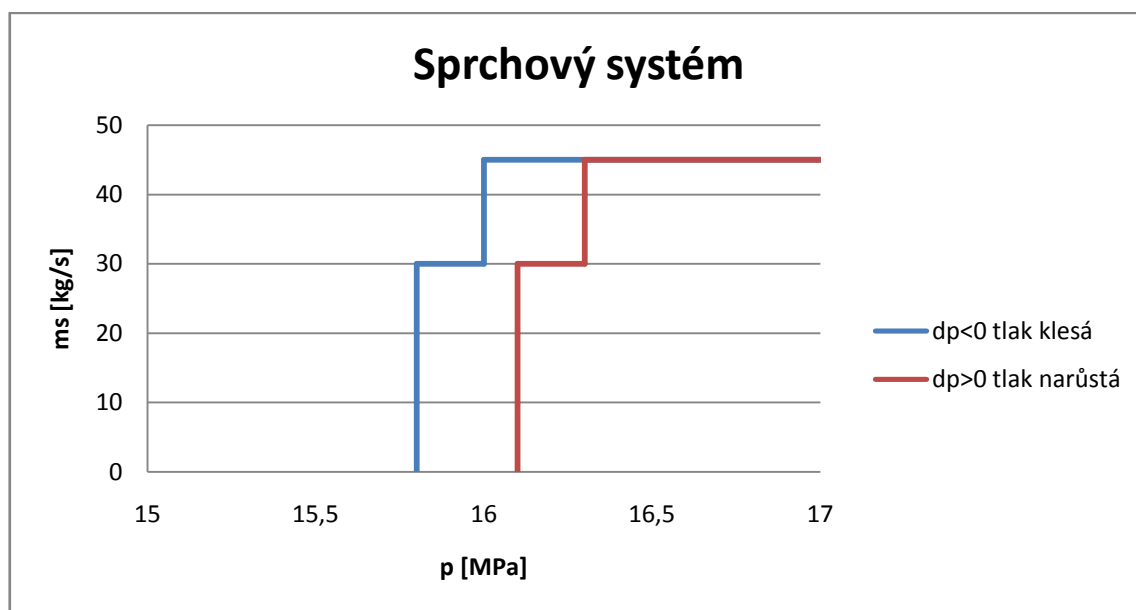
$$m_s = \frac{\frac{0,116 \cdot 2658,1 \cdot 6,8256 \cdot 10^{-4}}{0,009029 - 0,001727} + 0,04 + 0,143}{\frac{1662 - 1290}{2573 - 1662} + \frac{0,001727}{0,009029 - 0,001727}} \cong 45 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7.5)$$

Maximální průtok sprchovým systémem při zvýšení tlaku  $p = 0,116$

bude:  $m_s = 45 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$

Sprchový systém	hlavní	rezervní	jednotka
Otevírací tlak	16,1	16,3	MPa
Zavírací tlak	15,8	16	MPa
Průtočné množství	30	15	$\text{kg s}^{-1}$
Max. průtok sprchami	45		$\text{kg s}^{-1}$

6.4. Tabulka hodnoty tlaků otevírání a zavírání sprchových ventilů



6.4.1 Charakteristika sprchových ventilů

Kvůli utajení dokumentů a technickým datům jsou hodnoty v návrhu sprchového systému pouze orientační.

## 6.5 Návrh elektroohřivačů

Při návrhu elektroohřivačů uvažujeme tlak 15,7 MPa, kdy je výkon elektroohřivačů největší  $P_e = 1,6$  MW. Odvod páry pojistnými ventily je nulový  $m_v = 0$  a množství vody, které přitéká sprchovým systémem je rovněž nulové:

$m_s = 0$ , proto je nulové i množství vody, které zkondenzuje na sprchových kapkách  $m_{ch} = 0$  a množství primárního chladiva odtékajícího z kompenzátoru objemu  $(m_p + m_r) = 0$ .

Změnu množství vody v kompenzátoru objemu můžeme popsat:

$$m_1 = m_k + m_h - m_e \quad (7.6)$$

Pro změnu množství páry:

$$m_2 = -m_k - m_h + m_e = -m_1 \quad (7.7)$$

Změna tlaku je vyjádřena:

$$p = \frac{m_2 \cdot v'' + m_1 \cdot v_1}{m_2 \cdot E_2''} \quad (7.8)$$

Množství páry, které vzniká díky činnosti elektroohřivačů:

$$m_e = \frac{P_e}{i'' - i'} \quad (7.9)$$

Pokud dosadíme vztahy pro  $m_1$ ,  $m_2$  a  $m_e$  do rovnice pro  $p$ , získáme algebraickými úpravami vztah pro výkon elektroohřivačů:

$$P_e = \left( \frac{p \cdot m_2 \cdot E_2''}{v'' - v'} + m_k + m_h \right) \cdot (i'' - i') \quad (8.0)$$

Vstupní hodnoty pro výpočet elektroohřívачů:

$T'' = 343,2$	$^{\circ}\text{C}$	$L = 9,2$	$\text{m}$
$m_2 = 2366,9$	$\text{kg}$	$v'' = 0,01014$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$S_p = 40$	$\text{m}^2$	$v_1 = 0,001668$	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$S_H = 6,424$	$\text{m}^2$	$i'' = 2606$	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\alpha_{p-s} = 0,3$	$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$i' = 1926$	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\alpha_{p-v} = 100$	$\text{kW}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{K}^{-1}$	$E''_2 = 6,8256\cdot 10^{-4}$	

Maximální výkon ohřívачů:

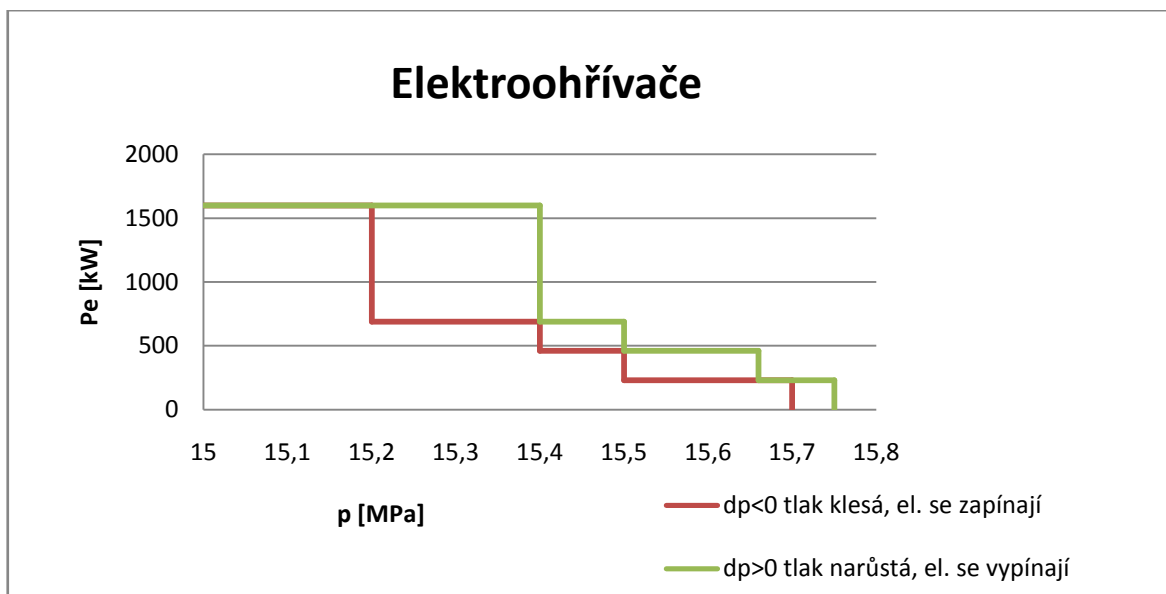
$$P_e = \left( \frac{0,011 \cdot 2366,9 \cdot 6,8256 \cdot 10^{-4}}{0,01014 - 0,001668} + 0,04 + 0,143 \right) \cdot (2606 - 1880) = 1657 \cong 1600 \text{ kW} \quad (8.1)$$

Pro snížení tlaku na  $p = 0,011$  potřebujeme výkon elektroohřívачů  $P_e = 1600 \text{ kW}$ .

Elektroohřívачe tvoří čtyři skupiny (viz tabulka xxx), které jsou zapínány regulátorem tlaku. První skupina je zapnuta neustále pro krytí tepelných ztrát a pro udržení chladicí vody na mezi sytosti.

Elektroohřívачe	1.	2.	3.	4.	jednotka
zapínací tlak	15,7	15,5	15,4	15,2	MPa
vypínací tlak	15,75	15,66	15,5	15,4	MPa
výkon	230	230	230	910	kW
celkový výkon	1600				kW

6.5 Tabulka zapínání a vypínání elektroohřívачů dle tlaku.



6.6. Charakteristika tlaku a výkonu elektroohříváčů

Výpočet elektroohříváče

Vstupní hodnoty:

$L = 2\,400\text{ mm}$

$d = 3\text{ mm}$

$h = 6\text{ mm}$

$ds = 11\text{ mm}$

$\rho = 1,158\ \Omega \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{m}^{-1}$

$Q_c = 1600\text{ kW}$

$U_1 = 23,7\text{ V}$

$U = 380\text{ V}$

Materiál je slitina ze 20 % Cr a 80 % Ni.

Pracovní teplota elektroohříváků je  $500\text{ }^\circ\text{C}$ .

Výpočet výkonu jednoho ohříváku:

$$Q_j = \frac{Q_c}{n} = \frac{1600000}{50} = 32\,000\,W \quad (8.2)$$

Navrhovaná délka topného odporu:

$$l_d = \left(\frac{L}{h}\right) \cdot \sqrt{(\pi \cdot ds)^2 + h^2} + L = \frac{2400}{6} \cdot \sqrt{(\pi \cdot 11)^2 + 6^2} + 2400 \quad (8.3)$$

$$l_d = 16430\,mm$$

Zdrojové teplo:

$$Q = \frac{4 \cdot Q_j}{\pi \cdot d^2 \cdot l_d} = \frac{4 \cdot 32000}{\pi \cdot 3^2 \cdot 16430} = 0,276\,W/mm^2 \quad (8.4)$$

Tepelný tok na povrchu vodiče:

$$P_1 = Q \cdot \frac{d}{4} = 0,2755 \cdot \frac{3}{4} = 0,207\,W \cdot mm^2 \quad (8.5)$$

Úbytek napětí:

$$dU = dU_1 \cdot \sqrt{P_1} \cdot \sqrt{\rho} = 23,7 \cdot \sqrt{0,207} \cdot \sqrt{1,158} = 11,603\,V \quad (8.6)$$

Proud v TO:

$$I = \frac{Q}{(U - dU)} = \frac{0,276}{(380 - 23,7)} = 0,7746\,A \quad (8.7)$$



Kontrola pracovní teploty elektroohříváčů a tepelných toků:

$d_1 = 25 \text{ mm}$	$\lambda_{350} = 20,3 \text{ W/mK}$
$d_2 = 19 \text{ mm}$	$\lambda_{415} = 15,9 \text{ W/mK}$
$d_3 = 12,2 \text{ mm}$	$\lambda_{455} = 21,5 \text{ W/mK}$
$d_4 = 9,8 \text{ mm}$	$\lambda_{495} = 14,0 \text{ W/mK}$
$d_5 = 3 \text{ mm}$	$\lambda_{520} = 22,4 \text{ W/mK}$
$L = 2\,400 \text{ mm}$	$Q_j = 32\,000 \text{ W}$

$$q_1 = \frac{Q_j}{\pi \cdot d_1 \cdot L} = \frac{32000}{\pi \cdot 25 \cdot 2400} = 0,170 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (8.8)$$

$$t_{s1} = 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$q_2 = \frac{Q_j}{\pi \cdot d_2 \cdot L} = \frac{32000}{\pi \cdot 19 \cdot 2400} = 0,223 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (8.9)$$

$$t_{s2} = \frac{q_1 \cdot r_2 \cdot \ln \frac{r_1}{r_2}}{\lambda_{350}} + t_{s1} = \frac{0,170 \cdot 10^6 \cdot 0,0095 \cdot \ln \frac{1,25}{0,95}}{\lambda_{350}} + 350 \quad (9.0)$$

$$t_{s2} = 372 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$q_3 = \frac{Q_j}{\pi \cdot d_3 \cdot L} = \frac{32000}{\pi \cdot 12,2 \cdot 2400} = 0,348 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (9.1)$$

$$t_{s3} = \frac{q_2 \cdot r_3 \cdot \ln \frac{r_2}{r_3}}{\lambda_{415}} + t_{s2} = \frac{0,223 \cdot 10^6 \cdot 0,0095 \cdot \ln \frac{0,95}{0,61}}{15,9} + 372 \quad (9.2)$$

$$t_{s3} = 431 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$q_4 = \frac{Q \cdot \frac{d_5}{4} \cdot \pi \cdot d_5 \cdot L}{\pi \cdot d_4 \cdot L} = \frac{Q \cdot d_5}{4 \cdot d_4} = \frac{0,276 \cdot 3}{4 \cdot 9,8} = 0,021 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (9.3)$$

$$t_{s4} = \frac{q_3 \cdot r_4 \cdot \ln \frac{r_3}{r_4}}{\lambda_{455}} + t_{s3} = \frac{0,348 \cdot 10^6 \cdot 0,0049 \cdot \ln \frac{0,61}{0,49}}{21,5} + 431 \quad (9.4)$$

$$t_{s4} = 448 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$q_5 = \frac{Q \cdot \frac{d_5}{4} \cdot \pi \cdot d_5 \cdot L}{\pi \cdot d_5 \cdot L} = \frac{Q \cdot d_5}{4} = \frac{0,276 \cdot 3}{4} = 0,207 \text{ W} \cdot \text{mm}^{-1} \quad (9.5)$$

$$t_{s5} = \frac{q_4 \cdot r_4 \cdot \ln \frac{r_4}{r_5}}{\lambda_{495}} + t_{s4} = \frac{0,021 \cdot 10^6 \cdot 0,0049 \cdot \ln \frac{0,49}{0,15}}{14} + 448 \quad (9.6)$$

$$t_{s5} = 457 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$t_0 = \frac{Q}{4 \cdot \lambda_{520}} \cdot r^2 + t_{s5} = \frac{0,276}{4 \cdot 22,4} \cdot 1,5^2 + 457 = 457 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.7)$$

Sřední pracovní teplota:

$$t_{stř} = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{t_{s3} + t_{s4}}{2} + \frac{t_{s5} + t_0}{2} \right) = \frac{1}{2} \cdot \left( \frac{431 + 448}{2} + \frac{457 + 457}{2} \right) = 448 \text{ } ^\circ\text{C} \quad (9.8)$$

Sřední pracovní teplota je nižší než předem zvolená hodnota 500 °C, pro kterou jsme určili odpor  $\rho$ , proto vyhovuje toleranci.

Kvůli utajení dokumentů a technickým datům jsou hodnoty v návrhu systému elektroohříváčů pouze orientační.

## 7 Návrh matematického modelu kompenzátoru objemu

Pro řešení a vyhodnocení přechodových stavů je sestaven matematický model kompenzátoru objemu, který umožňuje:

- volbu časového kroku
- vlastní délka výpočtu
- změnu vstupních hodnot
- změnu přítoku nebo odtoku do KO v časovém sledu
- grafické výstupy

Program pracuje ve dvou základních režimech:

### Nerovnovážný režim

Nastává při zvětšování objemu primárního chladiva. Teploty vody a páry jsou různé, tepelný tok na fázovém rozhraní je úměrný rozdílu teplot a plochy hladiny. Entalpie vody je pak menší než entalpie syté vody při daném tlaku.

### Rovnovážný režim

Nastává při zmenšování objemu primárního chladiva a průtoku vody z kompenzátoru objemu do primárního okruhu. Mezi vodou a párou je termodynamická rovnováha. Pokud entalpie vody při daném tlaku dosáhne entalpie syté vody, změní se nerovnovážný režim na rovnovážný.

### 7.1 Řešení matematického modelu

Matematický model byl přepracován na základě již zhotoveného modelu poskytnutém Prof. Ing. Pavlem Kolátem, DrSc., který se nachází na katedře energetiky VŠB.

V matematickém modelu jsou bilanční rovnice pro hmotnost, objem a energii uvažovány s pohyblivými hranicemi a časovou změnou objemu primárního chladiva. V termodynamicky nerovnovážném stavu se uvažuje vzájemné působení mezi parním a vodním objemem. V rovnovážném režimu se pak rovnice pro objem vody a páry v kompenzátoru objemu formulují společně.

Parametry vody v kompenzátoru objemu ovlivňuje:

- časová změna objemu primárního chladiva
- tepelný výkon elektroohříváčů
- dodávka sprchovací vody
- únik chladiva pojistnými ventily

Popis nerovnovážného stavu:

Změna objemu vytlačeného primárního chladiva je popsána rovnicí:

$$Q_{vp} = f(\tau) = f(p, t) = (m_p + m_r) \cdot v_p \quad (9.9)$$

Zadáva se jako vstupní veličina v závislosti na čase, resp. na střední teplotě a tlaku v prim. okruhu. Hmotnost vody v kompenzátoru objemu se zvětšuje dodávkou vody dodané ze sprchového systému a také v důsledku kondenzace páry na vodní hladině, sprchových kapkách a stěnách a snižuje v důsledku odparu vody při činnosti elektroohříváčů.

$$m_1 = m_s + m_h + m_{ch} + m_k + m_p + m_r - m_e \quad (10.0)$$

Hmotnost vody zkondenzované na sprchových kapkách za čas se určí:

$$m_{ch} = \frac{m_s \cdot (i' - i_s)}{i'' - i'} \quad (10.1)$$

- $i'$  = entalpie syté vody  
 $i''$  = entalpie syté páry  
 $i_s$  = entalpie sprchovací vody  
 $m_s$  = hmotnostní tok sprchami [kg/s]

kde předpokládáme, že na hladinu dopadne sytá voda.

Činností elektroohřívачů vzniká pára:

$$m_e = \frac{P_e}{i'' - i'} \quad (10.2)$$

$P_e$  = výkon elektroohřívачů v kW

Tepelný výkon přecházející z páry do stěny je dán vztahem:

$$P_I = \alpha_I \cdot S_I \cdot (T'' - T_s) \quad (10.3)$$

$S_I$  = plocha stěn KO nad hladinou (je funkcí výšky hladiny)

$T''$  = teplota syté páry  $T_s$ ... teplota stěny

$\alpha_I$  = součinitel přestupu tepla mezi párou a stěnou ( $\alpha_I = 0,3 \text{ kW/m}^2\text{deg}$ )

Hmotový tok zkondenzované vody ze stěn:

$$m_k = \frac{P_I}{i'' - i'} \quad (10.4)$$

Tepelný výkon z páry na hladinu:

$$P_{II} = \alpha_{II} \cdot S_{II} \cdot (T'' - T_1) \quad (10.5)$$

$\alpha_{II}$  = součinitel přestupu pára – voda ( $\alpha_{II} = 100 \text{ kW/m}^2\text{deg}$ )

$S_{II}$  = Plocha hladiny

$T_1$  = teplota hladiny (funkce entalpie vody)

Na hladině dochází ke kondenzaci:

$$m_h = \frac{P_{II}}{i'' - i'} \quad (10.6)$$

Změna celkového množství hmoty v kompenzátoru objemu:

$$m = m_1 + m_2 = m_s + m_p + m_r - m_v \quad (10.7)$$

Odvedený tepelný výkon z vody do stěn:

$$P_{III} = \alpha_{III} \cdot S_{III} \cdot (T_1 - T_s) \quad (10.8)$$

$\alpha_{III}$  = Součinitel přestupu tepla voda stěna ( $\alpha_{III} = 0,3 \text{ kW/m}^2\text{deg}$ )

$S_{III}$  = Plocha stěn pod hladinou (funkce výšky hladiny)

Tepelný výkon dodaný z páry do stěny v nerovnovážném stavu pro udržení na mezi sytosti určíme:

$$P_{IV} = m_2 \cdot \left( \frac{di''}{dp} - v'' \right) \cdot p \quad (10.9)$$

$m_2$  = hmotnostní přírůstek páry v čase (kg/s)

$\frac{di''}{dp}$  = derivace entalpie syté páry podle tlaku

$v''$  = měrný objem syté páry

$p$  = přírůstek tlaku v čase (MPa/s)

Pak se změna střední teploty stěny KO vypočte:

$$T_s = \frac{P_1 + P_3 + P_{IV}}{C_s} \quad (11.0)$$

kde:

$$C_s = 0,5 \cdot m_{KO} \cdot c_{Fe}$$

$C_s$  = tepelná kapacita kompenzátoru objemu

$m_{KO}$  = hmotnost kompenzátoru objemu

$c_{Fe}$  = měrné teplo železa

Výsledná diferenciální rovnice pro časovou změnu tlaku páry:

$$p = \frac{m_2 \cdot v'' + m_1 \cdot v_1}{m_2 \cdot E_3} \quad (11.1)$$

$$m_2 = m - m_1 = m_e - m_{ch} - m_k - m_v - m_h$$

$m_2$  = hmotnostní přírůstek páry v čase (kg/s)

$$E_3 = E_1 \cdot \left( \frac{di''}{dp} - v'' \right) - \frac{dv''}{dp} \quad (11.2)$$

$$E_1 = \frac{v'' - v'}{i'' - i'}$$

Kde:

$v''$  = měrný objem syté páry

$v'$  = měrný objem syté vody

$\frac{dv''}{dp}$  = derivace m. objemu páry podle tlaku

Změnu entalpie vody za čas určíme:

$$\frac{di_1}{d\tau} = \frac{P_e + P_{II} - P_{III} + (m_s + m_k + m_h + m_{ch}) \cdot (i - i_1) + (m_r + m_p) \cdot (i_p - i_1)}{m_1} - v_1 \cdot p \quad (11.3)$$

$$i = \frac{m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i''}{m}$$

$i$  = střední teplota chladiwa v kompenzátoru objemu

a její změna:

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{\left(m_1 \cdot i_1 + m_1 \cdot \frac{di_1}{dp} + m_2 \cdot \frac{di''}{dp}\right) \cdot m - m \cdot (m_1 \cdot i_1 + m_2 \cdot i'')}{m_2} \quad (11.4)$$

Změna výšky hladiny kompenzátoru objemu:

$$\frac{dL}{d\tau} = \left(m_1 \cdot \frac{dv_1}{dp} \cdot p - v \cdot m_1\right) \cdot \frac{1}{s_{II}} \quad (11.5)$$

Přítok a odtok chladiva je řešen jako funkce tlaku v primárním okruhu, střední teploty a činnosti sprchového systému, odebírajícího vodu ze studené větve primárního okruhu.

$$m_p = \frac{V_1 \cdot (v_1 - v_0)}{\tau_{u1} - \tau_{u0}} - m_s \quad (11.6)$$

$V_1$  = střední objem chladiva v primárním okruhu

$v_1$  = měrný objem chladiva v čase T

$v_0$  = měrný objem chladiva v čase T-1

$\tau_{u1} - \tau_{u0}$  = časový interval výpočtu

Rovnice (9.9) (10.0) (10.7) (11.0) (11.1) (11.3) (11.4) (11.5) tvoří systém osmi diferenciálních rovnic pro řešení přechodových jevů v KO. Pokud je splněna podmínka  $i_1 \geq i'$  přejde nerovnovážný režim v rovnovážný.

Popis rovnovážného stavu

V rovnovážném stavu se bilanční rovnice formulují společně pro objem vody i páry v kompenzátoru objemu. V platnosti zůstávají rovnice: (9.9) (10.0) (10.7) (11.0) (11.3) (11.5).



Časovou změnu tlaku vypočteme z energetické bilance pro celý kompenzátor objemu:

$$p = \frac{E_1 \cdot (P_e - P_1 - P_{III} + m_s \cdot (i'' - i) + (m_r + m_p) \cdot (i' - i)) + v \cdot m}{m_1 \cdot E_2 + m_2 \cdot E_3} \quad (11.7)$$

$$E_2 = E_1 \cdot \left( \frac{di'}{dp} - v' \right) - \frac{dv'}{dp} \quad (11.8)$$

Změna střední entalpie:

$$\frac{di}{d\tau} = \frac{P_e - P_I - P_{III} + m_s \cdot (i_s - i) - m_v \cdot (i'' - i) + (m_p + m_r) \cdot (i' - i)}{m} + v \cdot p \quad (11.9)$$

$$v = v' + x \cdot (v'' - v')$$

$$x = \frac{i - i'}{i'' - i'}$$

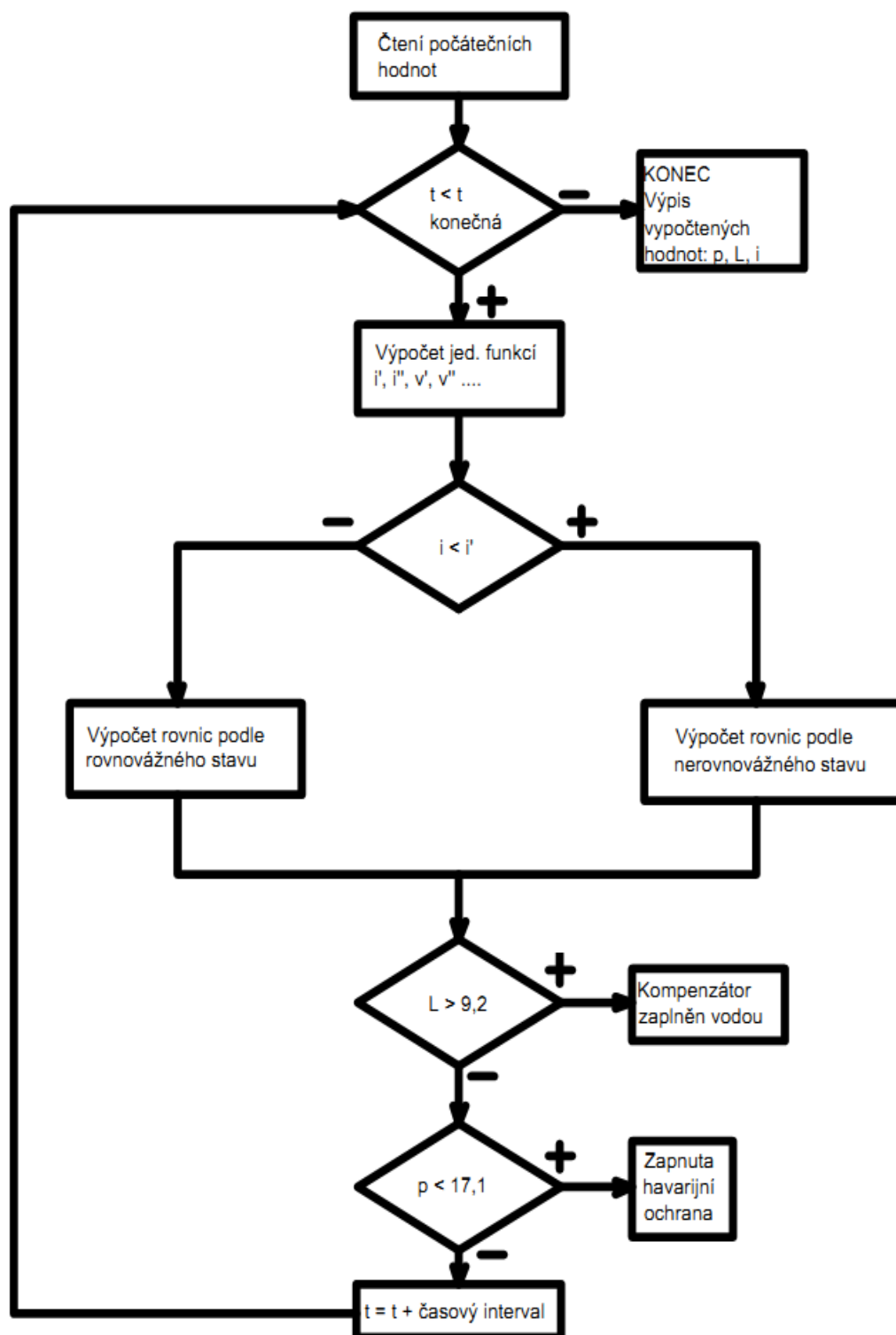
$v$  = měrný objem parovodní směsi

Diferenciální rovnice pro řešení rovnovážného a nerovnovážného stavu tvoří systém, který je uzavřený a který můžeme řešit, pokud známe funkce:

$i', i'', v', v'', T''$  = funkce tlaku

$v, T'$  = funkce entalpie

## 7.2 Vývojový diagram matematického modelu



### 7.3 Výpis části matematického modelu navrženého v programu MATLAB:

Procesy, které probíhají v kompenzátoru objemu, jsou popsány osmi diferenciálními rovnicemi. Jejich řešením dostaneme závislosti tlaku a výšky hladiny v na čase. Díky programu budeme moci výsledky vykreslit do grafu a vytisknout.

Program je rozdělen do několika podprogramů, které jsou volány hlavním programem: **main.m**

Program umožňuje:

volbu délky výpočtu  
změnu vstupních hodnot  
volbu časového intervalu  
změnu přítoku a odtoku do kompenzátoru objemu  
grafické znázornění

Výpis programu z matlabu:

**e1.m** - výpočet funkce e1 (závislé na tlaku)

```
function e1=e1(p)
e1=(vsp(p)-vsv(p))/(isp(p)-isv(p));
```

**e3.m** - výpočet funkce e3 (závislé na tlaku)

```
function e3=e3(p)
e3=((vsp(p)-vsv(p))/(isp(p)-isv(p)) * (ispdp(p)-vsp
(p))-vspdp(p));
```

**ip.m** - funkce pro výpočet entalpie chladiva vtékajícího do KO  
(závislé na teplotě studené a horké větve primárního okruhu)

```
function ip=ip(thot,tstud)
tpp=(tstud+thot)/2;
ip=0.0128*tpp^2 - 2.0365*tpp + 797.74;
```

**isp.m** - funkce entalpie syté páry (závislost na tlaku)

```
function isp=isp(p)
isp=-2.85403806906004E-04*p^6 + 1.78401318297148E-02*p^5 -
4.32836549213398E-01*p^4 + 5.14198589522320E+00*p^3 -
```

$$3.20692911384436E+01 \cdot p^2 + 9.13294887424962E+01 \cdot p + 2.71143359128066E+03;$$

**ispdp.m** - derivace entalpie syté páry podle tlaku (závislost na tlaku)

```
function isdp=ispdp(p)
ispdp=-1.712422841E-03*p^5+0.089200659*p^4-
1.731346197*p^3+15.42595769*p^2-
64.13858226*p+9.13294887424962E01;
```

**istud.m** - entalpie studené větve (závislost na tlaku)

```
function istud=istud(tstud)
istud=0.0128*tstud^2 - 2.0365*tstud + 797.74;
```

**isv.m** - entalpie syté vody (závislost na tlaku)

```
function isv=isv(p)
isv = 1.47727643394546E-04*p^6 - 7.28853251388273E-03*p^5 +
1.06215996658051E-01*p^4 + 8.74274802753234E-02*p^3 -
1.52766917246719E+01*p^2 +
1.74787884529474E+02*p+6.12850677237333E+02;
```

**isvdp.m** - derivace entalpie syté vody podle tlaku (závislost na tlaku)

```
function isvdp=isvdp(p)
isvdp=0.0008863658598*p^5-
0.036442662*p^4+0.424863986*p^3+0.26228244*p^2-
30.55338344*p+1.74787884529474E+02;
```

**me.m** - hmotnostní přírůstek vody v důsledku činnosti elektroohříváčů (závislost na tlaku a jeho derivaci)

```
function me=me(p, dp)
eo4=15.2; %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem 910 kW
eo3=15.4; %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem 230 kW
eo2=15.5; %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem 230 kW
eo1=15.7; %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem 230 kW
ez4=15.4; %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem 910 kW
ez3=15.55; %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem 230 kW
ez2=15.66; %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem 230 kW
ez1=15.75; %zapínací tlak elektroohříváků s výkonem 230 kW
me1=230; %výkon 1. skupiny v kW
me2=230; %výkon 2. skupiny v kW
me3=230; %výkon 3. skupiny v kW
me4=910; %výkon 4. skupiny v kW

if dp>0
if p>=ez1
e=0;
else if p<ez1&p>ez2
e=me1;
else if p<=ez2&p>ez3
e=me2+me1;
```

```

else if p<=ez3&p>ez4
e=me1+me2+me3;
else if p<=ez4
e =me1+me2 +me3 +me4;
end
end
end
end
end
end
if dp<=0
if p>eol
e=0;
else if p<=eol&p>eo2
e=me1;
else if p<=eo2&p>eo3
e=me1+me2;
else if p<=eo3&p>eo4
e =me1+me2 +me3;
else if p<=eo4
e =me1+me2 +me3 +me4;
end
end
end
end
end
end
me=e/(isp(p)-isv(p));

```

**mh.m** - hmotnostní přírůstek vody v důsledku kondenzace páry na hladině (závislost na tlaku na entalpii vody)

```

function mh=mh(p,il)
a2=100; %součinitel přestupu tepla pára - hladina
d=2.28; %průměr kompenzátoru objemu
mh= (3.1415*d^2)/4*a2* (tsp(p)-t1 (il) ) / (isp (p)-isv (p)
);

```

**mch.m** - hmotnostní přírůstek vody v důsledku kondenzace páry na sprchových kapkách (závislost na tlaku, derivaci tlaku a teplotě studené větve prim. okruhu)

```

function mch=mch(p,dp,tstud)
mch=(ms(p,dp)*(isv(p)-istud(tstud)))/(isp(p)-isv(p));

```

**mr.m** - regulace hladiny (závislost na tlaku a jeho derivaci)

```

function mr=mr(L)
H=9.2; %počáteční výška hladiny
dh=L-H;
if dh>=0.4
mr=-15;
else if dh<0.4&dh>=0

```

```

mr=-37.5*dh;
else if dh>-0.3&dh<0
mr=-50*dh;
else if dh<=-0.3
mr=15;
end
end
end
end

```

**ms.m** - hmotnostní tok sprchami (závislost na tlaku a jeho derivaci)

```

function ms=ms(p,dp)
%SPRCHOVÝ SYSTÉM
sol=16.1; %otevírací tlak pro sprchy s průtokem 30 kg/s
so2=16.3; %otevírací tlak pro sprchy s průtokem 15 kg/s
sz1=15.8; %zavírací tlak pro sprchy s průtokem 30 kg/s
sz2=16.0; %zavírací tlak pro sprchy s průtokem 15 kg/s
ms1=30; %průtočné množství v kg/s
ms2=15; %průtočné množství v kg/s
if dp>0
if p<sol
ms=0;

else if p>=sol&p<so2
ms=ms1;
else if p>=so2
ms=ms1+ms2;
end
end
end
end
if dp<=0
if p<=sz1
ms=0;
else if p>sz1&p<sz2
ms=ms1;
else if p>=sz2
ms=ms1+ms2;
end
end
end
end

```

**s1.m** - plocha stěn nad hladinou (závislost na výšce hladiny)

```

function s1=s1(L)
d=2.86; %průměr kompenzátoru objemu
VKOM=12.3; %vnitřní výška kompenzátoru objemu
s1=3.1415*d*(VKOM-L);

```

**s2.m** - plocha hladiny

```
function s2=s2(L)
d=2.86;      %průměr kompenzátoru objemu
VKOM=12.3;   %vnitřní výška kompenzátoru objemu
s2=pi*d*(VKOM-L);
```

**s3.m** - plocha stěn pod hladinou (závislost na výšce hladiny)

```
function s3=s3(L)
d=2.86; %průměr kompenzátoru objemu
s3=pi*d*L;
```

**t1.m** - teplota vody (závislost na entalpii vody)

```
function t1=t1(i1)
t1= -8E-05*i1^2 + 0.3897*i1 - 80.782;
```

**tsp.m** - teplota syté páry (závislost na tlaku)

```
function tsp=tsp(p)
tsp = -2.28170665401706E-05*p^6 + 1.79242379930855E-03*p^5
- 5.63483979145722E-02*p^4 + 9.12742893372993E-01*p^3 -
8.33594879395028E+00*p^2 + 5.00020073584045E+01*p +
1.38669087067872E+02;
```

**v1dp.m** - derivace měrného objemu vody podle tlaku (závislost na tlaku)

```
function v1dp=v1dp(p)
v1dp=-0.000525008*p + 0.00220227596614;
```

**vsp.m** - měrný objem syté páry (závislost na tlaku)

```
function vsp=vsp(p)
vsp= 0.2349395366224530000*p^ (-1.1877144961524800000);
```

**vspdp.m** - derivace měrného objemu syté páry podle tlaku (závislost na tlaku)

```
function vspdp=vspdp(p)
vspdp=-0.279041093*p^ (-2.18771449615248);
```

**vsv.m** - měrný objem syté vody (závislost na tlaku)

```
function vsv=vsv(p)
vsv=1.405699197319000E-09*p^6 - 8.509210508397980E-08*p^5 +
1.953027946760180E-06*p^4 - 2.107141930007480E-05*p^3 +
1.078257794853330E-04*p^2 - 1.985427093002740E-04*p +
1.266846440159470E-03;
```

**vsvdp.m** - derivace měrného objemu syté vody podle tlaku (závislost na tlaku)

```
function vsvdp=vsvdp(p)
vsvdp=8.434195182e-9*p^5-4.254605254e-7*p^4+7.812111784e-
6*p^3- 6.32142579e-5*p^2+2.156515588e-4*p-
1.98542709300274e-4;
```

**vv.m** - měrný objem vody v KO (závislost na tlaku)

```
function vv=vv(thot, tstud, pp)
tstred=(thot+tstud)/2;
vv=3.086e-3-8.99017e-4*(374.1-tstred)^0.147166-3.9e-3*(385-
tstred)^- 1.6*(pp-22.99)-7.18e-5;
```

**vv1.m** - měrný objem vody přitékající resp. odtékající do KO (závislost na tlaku)

```
function vv1=vv1(p)
clc
vv1=3E-07*p^2 - 2E-05*p + 0.0018-0.0001;
```

**vstupni\_\_hod.m** - zadané počáteční hodnoty pro výpočet

```
%Vstupni údaje kompenzátoru objemu AP1000%
p(1)=15.7; %počáteční tlak v MPa
V1(1)=28,4; %objem vody v m3
V2(1)=31,1; %objem páry v m3
alfa3=3; %součinitel přestupu tepla voda - stěna
alfa1=0.3; %součinitel přestupu tepla pára - stěna
alfa2=100; %součinitel přestupu tepla pára hladina
d=2.28; %průměr kompenzátoru objemu
L(1)=9.2; %výška hladiny
VKOM=12.3; %vnitřní výška kompenzátoru objemu
Mkom=215000; %celková hmotnost v kg
c=0.46509; %měrné teplo železa
tss(1)=320; %počáteční teplota stěny
i1(1)=1663.647548437;
dL(1)=0.001; dp(1) = 0.0001;
VI = 2.10451*10^5 * 0.0014174; s2 = pi*d^2/4;

Cs = 0.5 * Mkom * c;
```

**main.m** - hlavní program matematického modelu

```
clear;
clc;
pp=79;
thot=360;
tstud=343.2;
cas=0;
qq=0;
format long;
vstupni_hod;
vstupni_hod2;
isv_(1)=isv(p(1));
isp_(1)=isp(p(1));
vsp_(1)= vsp(p(1));
isp_(1)= isp(p(1));
tsp_(1)= tsp(15.76630977656);
m2(1) = 0;
M1(1)= V1(1) / vv1(p(1));
```



```

M2(1)= V2(1) / vsp(p(1));
M(1)=M1(1)+M2(1);
i(1)=(M1(1)*i1(1)+M2(1)*isp(p(1)))/(M1(1)+M2(1));
ip_(1)=ip(thot(1),tstud(1));
t1_(1)=t1(1662.647548437);

for j=2:601
T(j)=-8E-05*isv_(1)^2+0.3897*isv_(1)-80.782;
vsp_(j)=vsp(p(j-1));
isp_(j)=isp(p(j-1));
tsp_(j)=tsp(p(j-1));
vsv_(j)=vsv(p(j-1));
isv_(j)=isv(p(j-1));
ispdp_(j)=ispdp(p(j-1));
isvdp_(j)=isvdp(p(j-1));
e1_(j)=e1(p(j-1));
e3_(j)=e3(p(j-1));
vsmdp_(j)=vsmdp(p(j-1));
vspdp_(j)=vspdp(p(j-1));
vldp_(j)=vldp(p(j-1));
vv1_(j)=vv1(p(j-1));
vv_(j)=vv(thot(j-1),tstud(j-1),pp(j-1));
ip_(j)=ip(thot(j-1),tstud(j-1));
ms_(j)=ms(p(j-1),dp(j-1));
mv_(j)=mv(p(j-1),dp(j-1));
me_(j)=me(p(j-1),dp(j-1));
mr_(j)=mr(L(j-1));
s1_(j)=s1(L(j-1));
s3_(j)=s3(L(j-1));

mch_(j) = mch(p(j-1), dp(j-1), tstud(j-1));
istud_(j) = istud(tstud(j-1));
mh_(j) = mh(p(j-1), i1(j-1));
t1_(j) = t1(i1(j-1));
mp_(j) = -25;
Pe_(j) = me_(j) * (isp_(j) - isv_(j));
mp_(j) = (VI * (vv_(j-1)-vv_(j)) / (T(j) - T(j-1)) -
ms_(j));
PI_(j) = alfa1 * s1_(j) * (tsp_(j) - tss(j-1));
PII_(j) = alfa2 * s2 * (tsp_(j) - t1_(j));
PIII_(j)= alfa3 * s3_(j) * (t1_(j) - tss(j-1));
PIV_(j) = m2(j-1) * (ispdp_(j) - vsp_(j)) * dp(j-1);

dtss(j) = (PI_(j) + PIII_(j)+PIV_(j)) / Cs;
tss(j)=tss(j-1) + dtss(j) * (T(j) - T(j-1));
mk(j) = PI_(j) / (isp_(j) - isv_(j));

m1(j) = ms_(j) + mh_(j) + mch_(j) + mk(j) + mp_(j) +
mr_(j)-me_(j);

```

```

m(j) = ms_(j) - mv_(j) + mp_(j) + mr_(j);
m2(j) = me_(j)-mch_(j)-mk(j)-mv_(j)-mh_(j);
M1(j) = M1(j-1) + m1(j) * (T(j) - T(j-1));
M2(j) = M2(j-1) + m2(j) * (T(j) - T(j-1));
M(j) = M(j-1) + m(j) * (T(j) - T(j-1));

if p>=15.7
%nerovnovážný stav
zz(j)=1;
V2(j)=-m1(j)*vv1_(j);
dp(j)=(m2(j) * vsp_(j) -V2(j)) / (M2(j)*e3_(j));
p(j)=p(j-1)+dp(j)*(T(j) - T(j-1));
i(j)=(M1(j) * i1(j-1) + M2(j) * isp_(j)) / M1(j);

di1(j)=(Pe_(j) +PII_(j) -PIII_(j) + (ms_(j) + mk(j) +
mh_(j) + mch_(j)) * (i(j)-i1(j-1)) +
(mr_(j)+mp_(j))*(ip_(j)-i1(j-1)))/M1(j)- vv1_(j)*dp(j);
i1(j)=i1(j-1) + di1(j) * (T(j) - T(j-1));

else
qq(j)=1;
%rovnovážný stav
x(j)=(i(j-1)-isv_(j))/(isp_(j)-isv_(j));
v(j)=vsv_(j)+x(j)*(vsp_(j)-vsv_(j));
e2(j)=(vsp_(j)-vsv_(j))/(isp_(j)-isv_(j))*(isvdp_(j)-v(j))-
vsvdp_(j);
dp(j) = (e1(j)*(Pe_(j)-PI(j)-PIII_(j)+ms_(j)*(istud_(j)-
i(j-1))-mv_(j)*(isp_(j)-i(j-1)))+(mr_(j)+mp_(j))*(isv_(j)-
i(j-1)))+v(j)*m(j)) / (M1(j)*e2(j)+M2(j)*e3_(j));
p(j)=p(j-1)+dp(j)*(T(j) - T(j-1));
di(j)=(Pe_(j) - PI_(j) - PIII_(j) + ms_(j)*(istud_(j)-i(j-
1))-mv_(j)*(isp_(j)-i(j-1)))+(mr_(j)+mp_(j))*(isv_(j)-i(j-
1)))/M(j)+v(j)*dp(j);

i(j)=i(j-1) + di(j) * (T(j) - T(j-1));
di1(j) = (Pe_(j) + PI_(j) - PII_(j) + (ms_(j) + mk(j) +
mh_(j) + mch_(j)) * (i(j)-i1(j-
1)))+(mr_(j)+mp_(j))*(isv_(j)-i1(j-1)))/M1(j)-
vv1_(j)*dp(j);
i1(j)=i1(j-1) + di1(j) * (T(j) - T(j-1));

end

dL(j) = (M1(j)*vsvdp_(j)*dp(j)+m1(j)*vv1_(j))*1/s2;
L(j)=L(j-1) + dL(j) * (T(j) - T(j-1));
cas(j)=cas(j-1)+dT;
plot(cas,p)

```

```

if L(j)>12.3
disp('kompenzátor zaplněn vodou')
break
end
if p(j)>=18.2
disp('zapnuta havarijní ochrana')
break
end
end
end

```

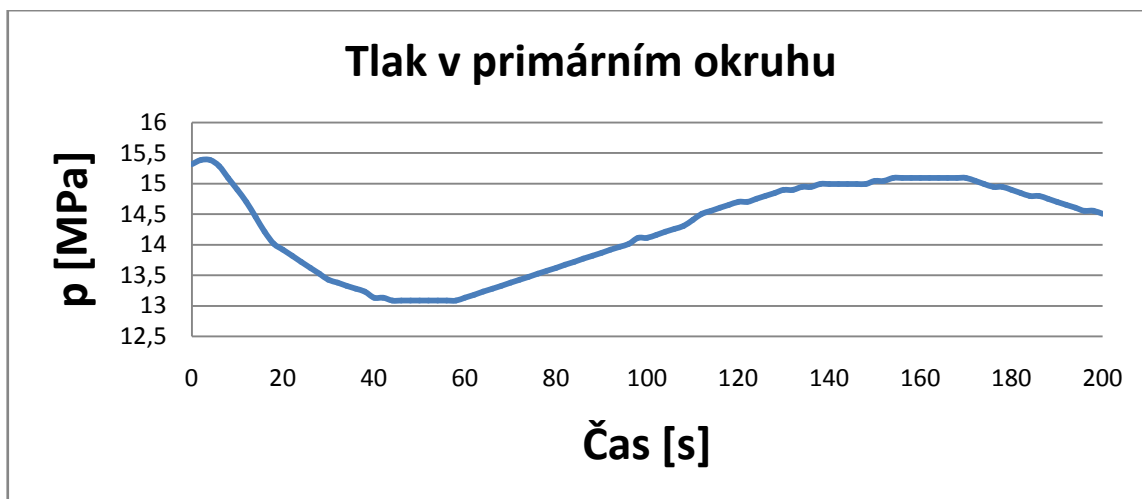
[16], [17]

## 8 Výsledky vybraných přechodových stavů

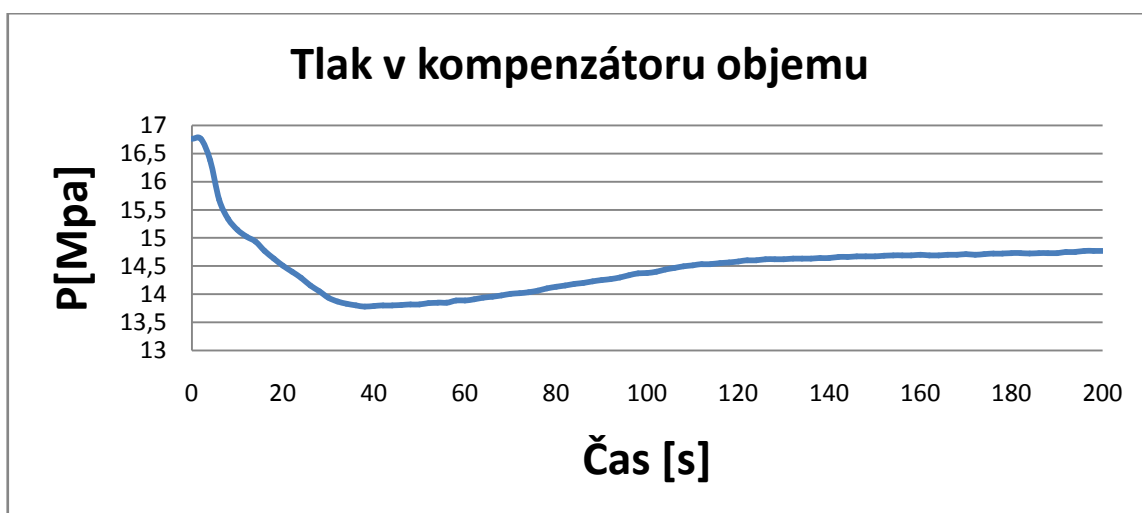
Vzhledem k utajení konstrukčních dat a vstupních hodnot firmou Westinghouse, jsou výstupní hodnoty pouze obrazné. Vstupní hodnoty byly zadány porovnávací metodou. Po odtajnění dokumentů je možná změna vstupních hodnot jednoduchou změnou funkce: vstupni\_\_hod.m

### 8.1 Odstavení čtyř hlavních cirkulačních čerpadel s požadavkem na samocirkulaci

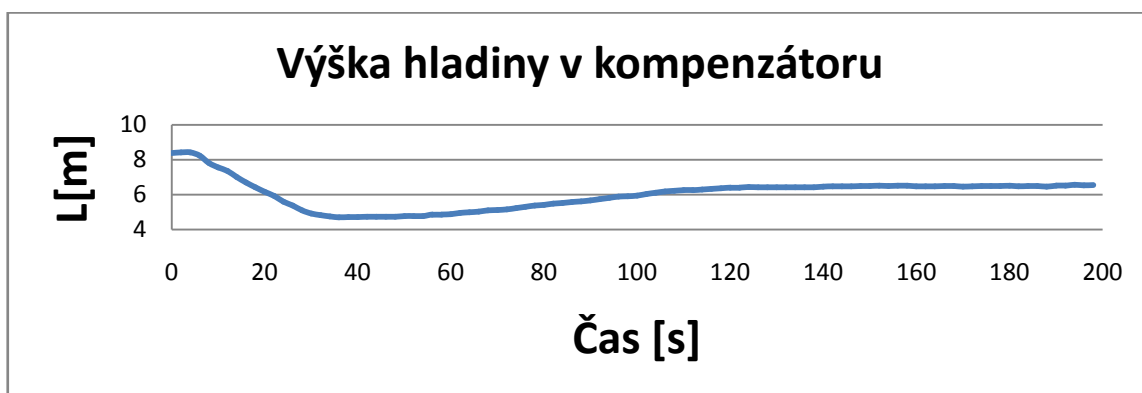
Vypnutí všech hlavních cirkulačních čerpadel je z hlediska bezpečnosti snad největší problém. Nucená cirkulace musí v primárním okruhu přejít na samocirkulaci. Do dvou sekund po odstavení čerpadel zasahuje havarijní ochrana, která odstaví reaktor. Než systém přejde do tohoto stavu, tlak a teplota v primárním okruhu se snižují. Po odstávce se tlak a teplota opět zvyšují až na hodnoty, kdy jsou výška hladiny a hmotnostní tok ustáleny.



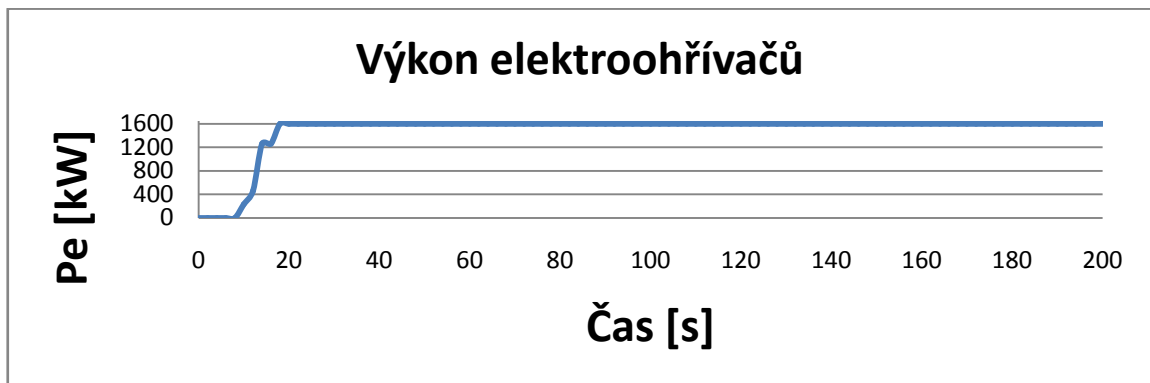
Obr. 8.1.1 Průběh tlaku v primárním okruhu za čas



Obr. 8.1.2 Průběh tlaku v kompenzátoru objemu za čas



Obr. 8.1.3 Průběh výšky hladiny v kompenzátoru objemu za čas



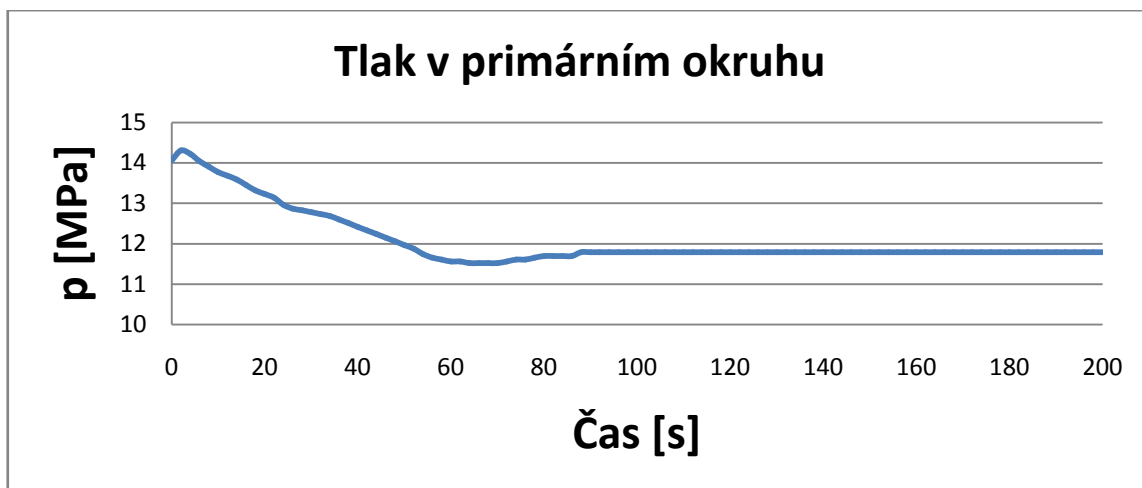
Obr. 8.1.4 Průběh výkonu elektroohřivačů za čas



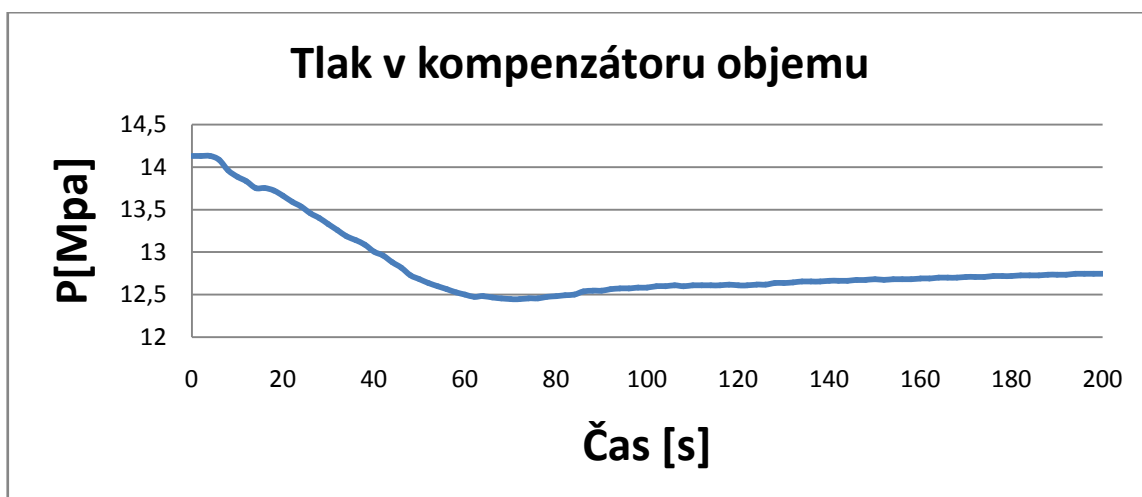
Obr. 8.1.5 Závislost hmotnostního toku z prim. okruhu do kompenzátoru objemu za čas

## 8.2 Uzavření ventilu turbogenerátoru

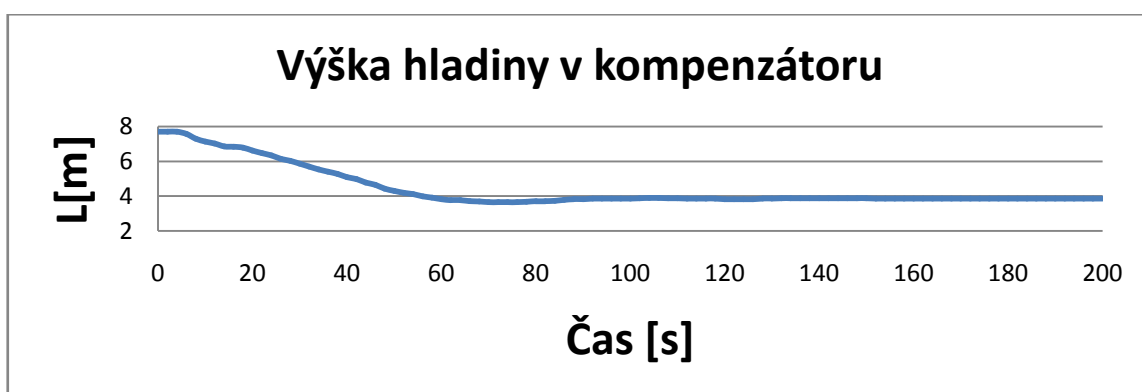
Ztráta elektrické zátěže může být způsobena buď ochranou turbogenerátoru, nebo hydraulických a elektrických systémů regulace. Do dvou sekund zareaguje havarijní ochrana. Výkon reaktoru je postupně snižován až na úroveň zbytkového tepla. Počáteční hodnoty jsou dány podle Obr. 8.2.1 (tlak v prim. okruhu.).



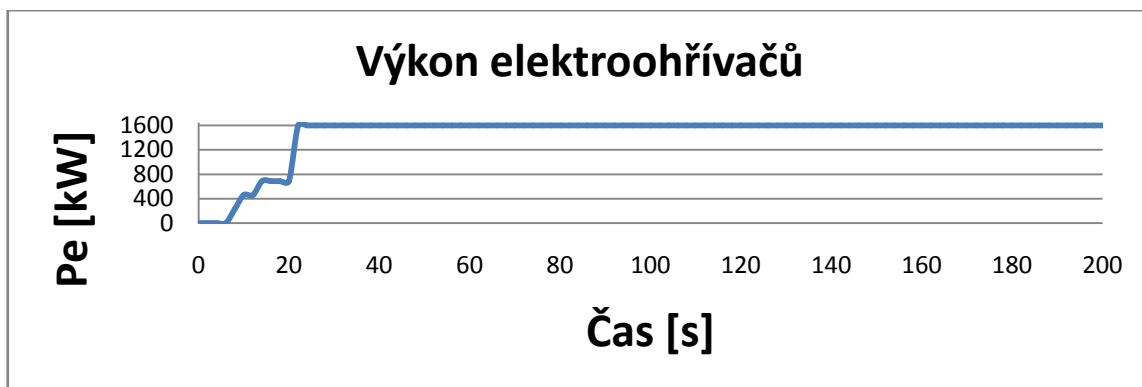
Obr. 8.2.1 Průběh tlaku v primárním okruhu za čas



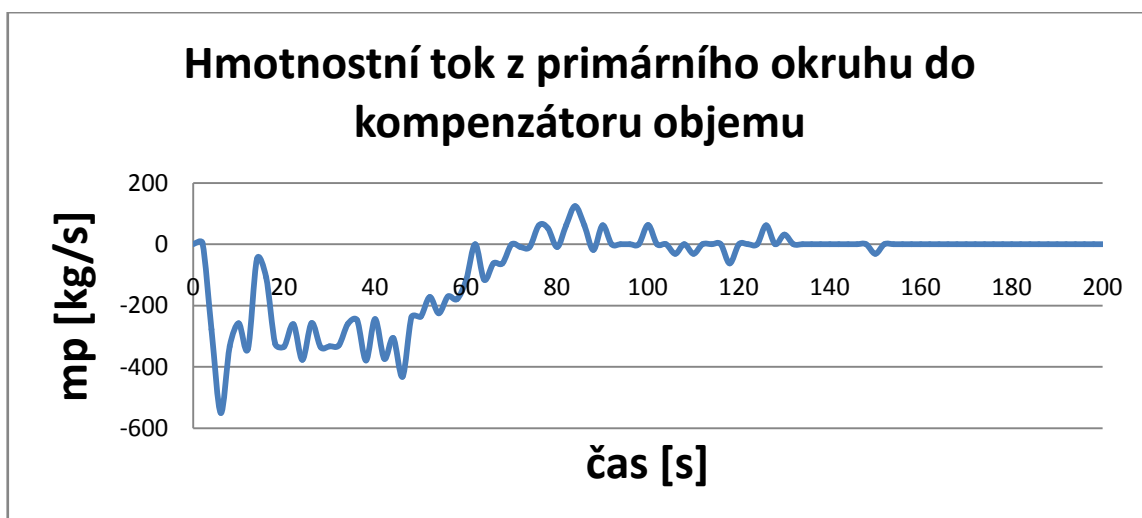
Obr. 8.2.2 Průběh tlaku v kompenzátoru objemu za čas



Obr. 8.2.3 Průběh výšky hladiny v kompenzátoru objemu za čas



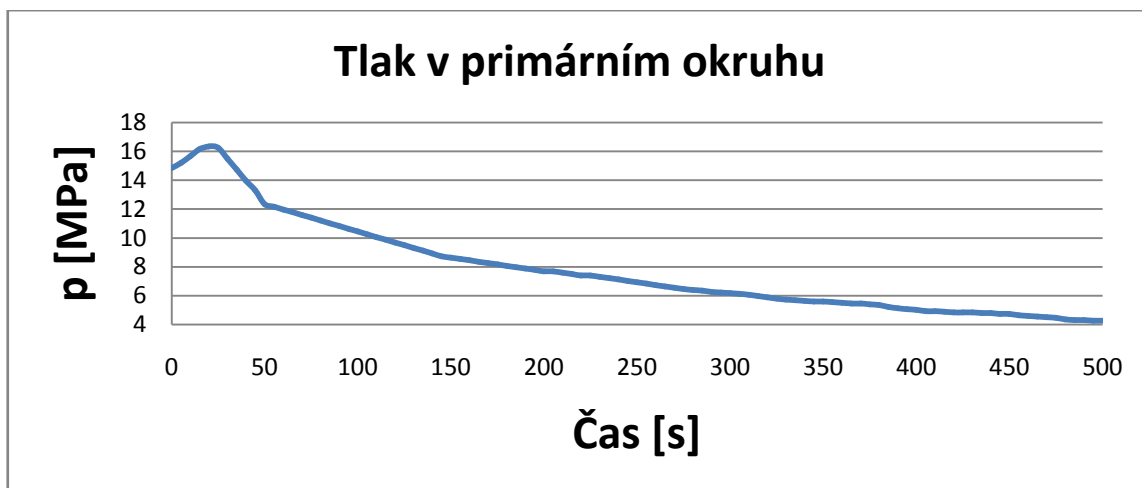
Obr. 8.2.4 Průběh výkonu elektroohřivačů za čas



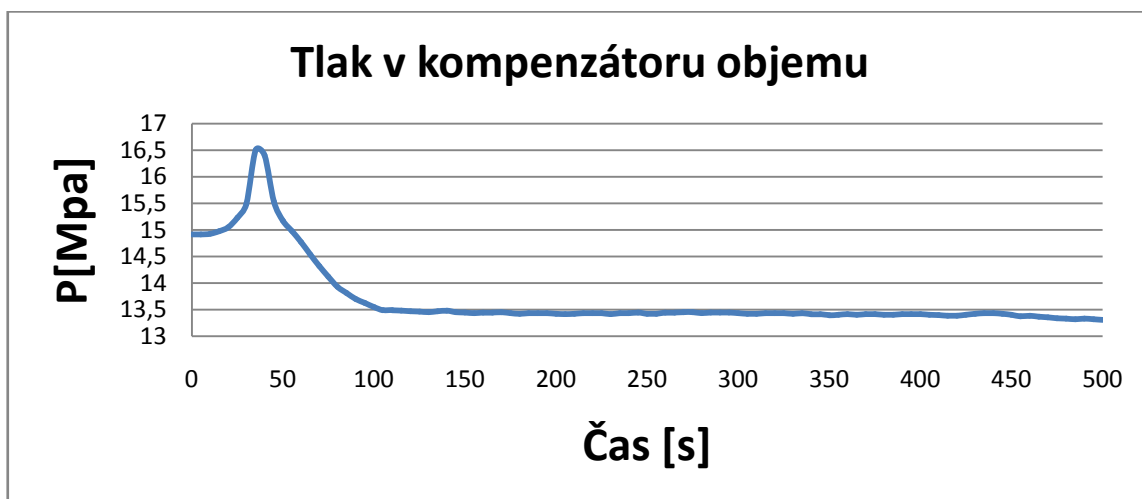
Obr.8.2.5 Závislost hmotnostního toku z prim. okruhu do kompenzátoru objemu za čas

### 8.3 Simulace netěsnosti v primárním a sekundárním okruhu

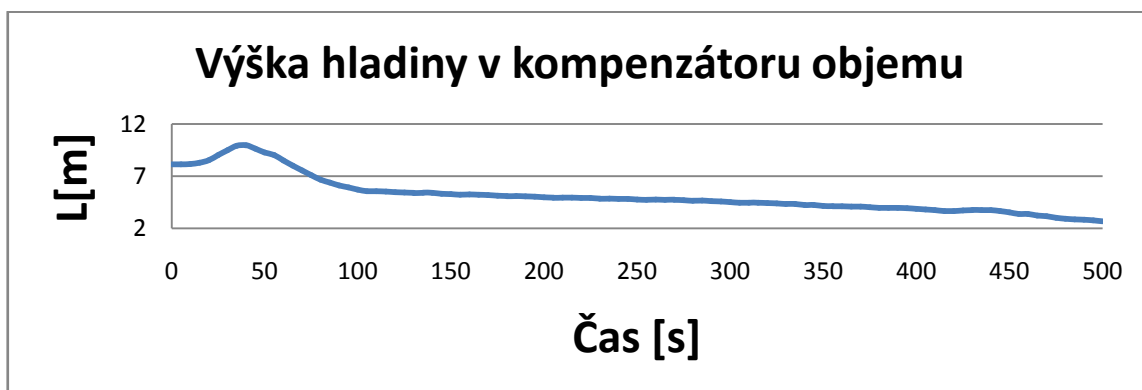
Pro tento přechodový proces je charakteristický nárůst a následně prudký pokles tlaku, kvůli zapojení havarijní ochrany a netěsnosti okruhu. Průběh tlaku v tomto přechodovém stavu kopíruje výška hladiny.



Obr. 8.3.1 Průběh tlaku v primárním okruhu za čas

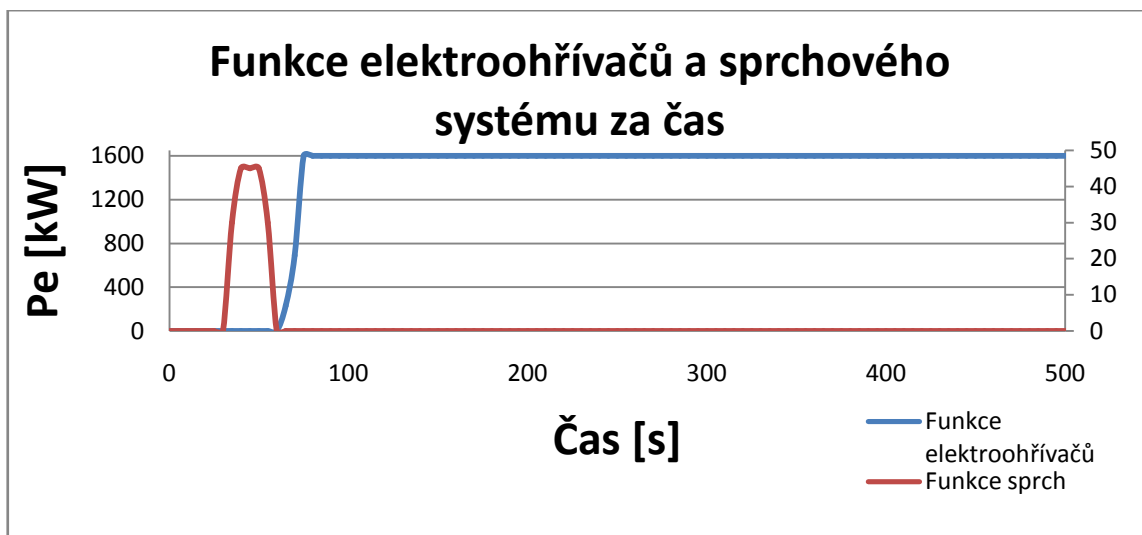


Obr. 8.3.2 Průběh tlaku v kompenzátoru objemu za čas

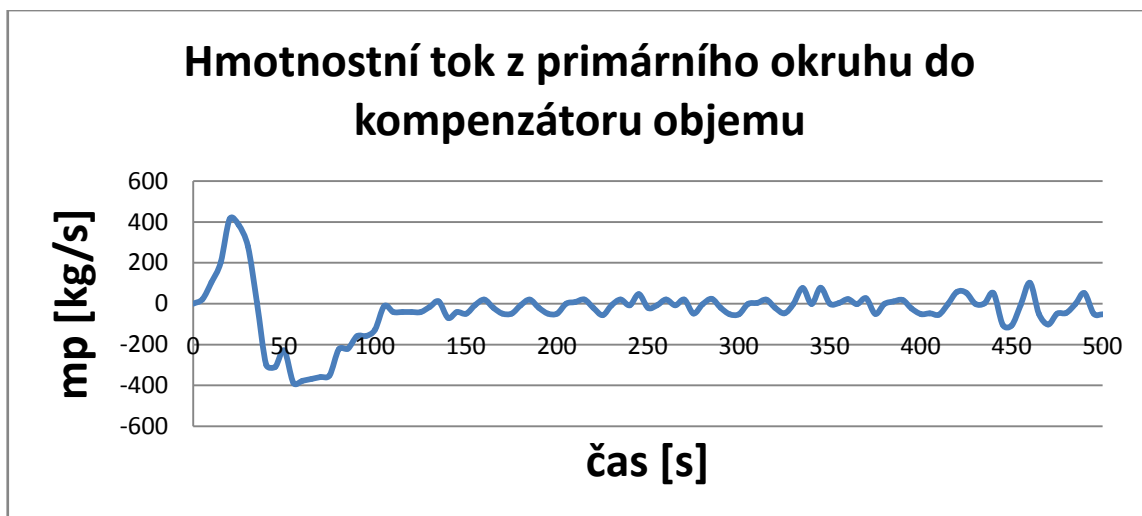


Obr. 8.3.3 Průběh výšky hladiny v kompenzátoru objemu za čas





Obr. 8.3.4 Funkce elektroohřivačů a sprchového systému za čas



Obr. 8.3.5 Závislost hmotnostního toku z prim. okruhu do kompenzátoru objemu za čas

## 9 Hodnoty pro vybrané přechodové stavy:

### 9.1 Odstavení čtyř hlavních cirkulačních čerpadel s požadavkem na samocirkulaci

Čas	Množství páry	Tlak v kompenzátoru	Výška hladiny	Sprchy	Elektroohřivače	Tlak v primárním okruhu
[s]	[kg/s]	[MPa]	[m]	[°C]	[kW]	[MPa]
0	0	16,758	8,3888	0	0	15,3174
2	62,9356	16,758	8,4182	0	0	15,386
4	0	16,3758	8,4182	0	0	15,386
6	-385,9436	15,68	8,232	0	0	15,288
8	-841,526	15,337	7,8106	0	0	15,092
10	-506,856	15,141	7,5656	0	230	14,896
12	30,2918	15,0234	7,3598	0	460	14,7
14	-716,6838	14,9352	7,007	0	1260	14,455
16	-629,0816	14,7686	6,6934	0	1260	14,21
18	-557,4926	14,6314	6,419	0	1600	14,014
20	-500,045	14,504	6,1642	0	1600	13,916
22	-494,4002	14,3962	5,9192	0	1600	13,818
24	-634,1776	14,2884	5,6056	0	1600	13,72
26	-482,2384	14,1512	5,3704	0	1600	13,622
28	-548,163	14,0532	5,096	0	1600	13,524
30	-331,4066	13,9356	4,9294	0	1600	13,426
32	-199,9004	13,867	4,8314	0	1600	13,377
34	-129,3208	13,8278	4,7628	0	1600	13,328
36	-129,0268	13,7984	4,704	0	1600	13,279
38	10,4174	13,7788	4,7138	0	1600	13,23
40	20,8152	13,7886	4,7236	0	1600	13,132
42	0	13,7984	4,7334	0	1600	13,132
44	10,4076	13,7984	4,7334	0	1600	13,083
46	0	13,8082	4,7432	0	1600	13,083
48	0	13,818	4,7432	0	1600	13,083
50	69,8054	13,818	4,7824	0	1600	13,083
52	0	13,8376	4,7824	0	1600	13,083
54	0	13,8474	4,7824	0	1600	13,083
56	139,9342	13,8474	4,8608	0	1600	13,083
58	0	13,8866	4,8608	0	1600	13,083
60	59,6036	13,8866	4,8902	0	1600	13,132
62	129,948	13,9062	4,9588	0	1600	13,181
64	59,7996	13,9356	4,9882	0	1600	13,23
66	59,8388	13,9552	5,0274	0	1600	13,279
68	130,5262	13,9748	5,096	0	1600	13,328
70	60,0544	14,0042	5,1254	0	1600	13,377

72	60,0544	14,014	5,1548	0	1600	13,426
74	131,173	14,0336	5,2234	0	1600	13,475
76	167,1096	14,063	5,3116	0	1600	13,524
78	131,9276	14,1022	5,3802	0	1600	13,573
80	60,6032	14,1316	5,4194	0	1600	13,622
82	132,4274	14,1512	5,488	0	1600	13,671
84	60,7894	14,1806	5,5174	0	1600	13,72
86	132,9174	14,2002	5,586	0	1600	13,769
88	60,9854	14,2296	5,6252	0	1600	13,818
90	97,2062	14,2492	5,6742	0	1600	13,867
92	133,6818	14,2688	5,7428	0	1600	13,916
94	134,0346	14,2982	5,8114	0	1600	13,965
96	134,3874	14,3374	5,8898	0	1600	14,014
98	50,1074	14,3668	5,9094	0	1600	14,112
100	73,1374	14,3766	5,9486	0	1600	14,112
102	171,8038	14,3962	6,0466	0	1600	14,161
104	135,5732	14,4354	6,1152	0	1600	14,21
106	135,9456	14,4648	6,1838	0	1600	14,259
108	62,2202	14,4942	6,223	0	1600	14,308
110	87,5238	14,5138	6,2622	0	1600	14,406
112	-23,7062	14,5334	6,2622	0	1600	14,504
114	62,279	14,5334	6,2916	0	1600	14,553
116	62,3182	14,553	6,3308	0	1600	14,602
118	62,3966	14,5628	6,3602	0	1600	14,651
120	62,475	14,5824	6,3994	0	1600	14,7
122	0	14,602	6,3994	0	1600	14,7
124	62,5044	14,602	6,4386	0	1600	14,749
126	-12,054	14,6216	6,4288	0	1600	14,798
128	-12,054	14,6216	6,4288	0	1600	14,847
130	-12,0442	14,6216	6,4288	0	1600	14,896
132	0	14,6314	6,4288	0	1600	14,896
134	-12,0638	14,6314	6,4288	0	1600	14,945
136	0	14,6314	6,4288	0	1600	14,945
138	-12,054	14,6412	6,4288	0	1600	14,994
140	74,4898	14,6412	6,468	0	1600	14,994
142	0	14,6608	6,4778	0	1600	14,994
144	0	14,6608	6,4778	0	1600	14,994
146	0	14,6706	6,4778	0	1600	14,994
148	0	14,6706	6,4876	0	1600	14,994
150	25,1664	14,6706	6,4974	0	1600	15,043
152	0	14,6804	6,5072	0	1600	15,043
154	-12,1226	14,6902	6,4974	0	1600	15,092
156	0	14,6902	6,5072	0	1600	15,092
158	0	14,6902	6,5072	0	1600	15,092
160	-74,4702	14,7	6,4778	0	1600	15,092

162	0	14,6902	6,4778	0	1600	15,092
164	0	14,6902	6,4778	0	1600	15,092
166	0	14,7	6,4876	0	1600	15,092
168	0	14,7	6,4876	0	1600	15,092
170	-37,191	14,7098	6,468	0	1600	15,092
172	12,054	14,7	6,4778	0	1600	15,043
174	12,0736	14,7098	6,4876	0	1600	14,994
176	12,054	14,7196	6,4974	0	1600	14,945
178	0	14,7196	6,4974	0	1600	14,945
180	12,0638	14,7294	6,5072	0	1600	14,896
182	-62,3868	14,7294	6,4778	0	1600	14,847
184	12,0148	14,7196	6,4876	0	1600	14,798
186	0	14,7294	6,4974	0	1600	14,798
188	-62,3966	14,7294	6,468	0	1600	14,749
190	86,4164	14,7294	6,517	0	1600	14,7
192	12,0148	14,749	6,517	0	1600	14,651
194	86,6222	14,749	6,566	0	1600	14,602
196	-62,622	14,7686	6,5366	0	1600	14,553
198	0	14,7686	6,5464	0	1600	14,553
200	11,9952	14,7686	6,5462	0	1600	14,504

## 9.2 Uzavření ventilu turbogenerátoru

Čas	Množství páry	Tlak v kompenzátoru	Výška hladiny	Sprchy	Elektroohřivače	Tlak v primárním okruhu
[s]	[kg/s]	[MPa]	[m]	[°C]	[kW]	[MPa]
0	0	14,13	7,704	0	0	14,067
2	4,041	14,13	7,704	0	0	14,31
4	-277,731	14,13	7,704	0	0	14,22
6	-549,396	14,085	7,569	0	0	14,04
8	-333,063	13,959	7,299	0	230	13,905
10	-257,04	13,887	7,137	0	460	13,77
12	-340,569	13,833	7,02	0	460	13,68
14	-48,258	13,752	6,849	0	690	13,59
16	-108,666	13,752	6,831	0	690	13,455
18	-324,693	13,725	6,786	0	690	13,32
20	-333,882	13,662	6,624	0	690	13,23
22	-260,469	13,59	6,462	0	1600	13,14
24	-376,344	13,536	6,336	0	1600	12,96

26	-256,599	13,455	6,147	0	1600	12,87
28	-335,043	13,401	6,021	0	1600	12,825
30	-332,181	13,329	5,859	0	1600	12,78
32	-329,409	13,257	5,697	0	1600	12,735
34	-259,47	13,185	5,535	0	1600	12,69
36	-247,419	13,14	5,409	0	1600	12,6
38	-378,81	13,086	5,283	0	1600	12,51
40	-243,981	13,005	5,094	0	1600	12,42
42	-373,473	12,96	4,977	0	1600	12,33
44	-305,577	12,879	4,788	0	1600	12,24
46	-432,072	12,816	4,644	0	1600	12,15
48	-236,889	12,726	4,428	0	1600	12,06
50	-235,737	12,681	4,311	0	1600	11,97
52	-171,387	12,636	4,194	0	1600	11,88
54	-224,604	12,6	4,113	0	1600	11,745
56	-170,154	12,564	3,996	0	1600	11,655
58	-178,704	12,528	3,915	0	1600	11,61
60	-115,749	12,501	3,825	0	1600	11,565
62	0	12,474	3,771	0	1600	11,565
64	-115,479	12,483	3,771	0	1600	11,52
66	-62,127	12,465	3,717	0	1600	11,52
68	-62,046	12,456	3,69	0	1600	11,52
70	0	12,447	3,654	0	1600	11,52
72	-8,937	12,447	3,654	0	1600	11,565
74	-8,946	12,456	3,654	0	1600	11,61
76	61,992	12,456	3,654	0	1600	11,61
78	53,091	12,474	3,681	0	1600	11,655
80	-8,991	12,483	3,708	0	1600	11,7
82	62,118	12,492	3,708	0	1600	11,7
84	124,506	12,501	3,735	0	1600	11,7
86	62,388	12,537	3,798	0	1600	11,7
88	-18,162	12,546	3,834	0	1600	11,79
90	62,433	12,546	3,825	0	1600	11,79
92	0	12,564	3,861	0	1600	11,79
94	0	12,573	3,861	0	1600	11,79
96	0	12,573	3,861	0	1600	11,79
98	0	12,582	3,861	0	1600	11,79
100	62,514	12,582	3,861	0	1600	11,79
102	0	12,6	3,888	0	1600	11,79
104	0	12,6	3,897	0	1600	11,79
106	-31,266	12,609	3,897	0	1600	11,79
108	0	12,6	3,879	0	1600	11,79
110	-31,248	12,609	3,879	0	1600	11,79
112	0	12,609	3,861	0	1600	11,79
114	0	12,609	3,87	0	1600	11,79

116	0	12,609	3,87	0	1600	11,79
118	-62,433	12,618	3,87	0	1600	11,79
120	0	12,609	3,834	0	1600	11,79
122	0	12,609	3,834	0	1600	11,79
124	0	12,618	3,834	0	1600	11,79
126	62,433	12,618	3,834	0	1600	11,79
128	0	12,636	3,87	0	1600	11,79
130	31,248	12,636	3,87	0	1600	11,79
132	0	12,645	3,888	0	1600	11,79
134	0	12,654	3,888	0	1600	11,79
136	0	12,654	3,888	0	1600	11,79
138	0	12,654	3,888	0	1600	11,79
140	0	12,663	3,888	0	1600	11,79
142	0	12,663	3,888	0	1600	11,79
144	0	12,663	3,888	0	1600	11,79
146	0	12,672	3,888	0	1600	11,79
148	0	12,672	3,888	0	1600	11,79
150	-31,248	12,681	3,888	0	1600	11,79
152	0	12,672	3,87	0	1600	11,79
154	0	12,681	3,87	0	1600	11,79
156	0	12,681	3,87	0	1600	11,79
158	0	12,681	3,87	0	1600	11,79
160	0	12,69	3,87	0	1600	11,79
162	0	12,69	3,87	0	1600	11,79
164	0	12,699	3,87	0	1600	11,79
166	0	12,699	3,87	0	1600	11,79
168	0	12,699	3,87	0	1600	11,79
170	0	12,708	3,87	0	1600	11,79
172	0	12,708	3,87	0	1600	11,79
174	0	12,708	3,87	0	1600	11,79
176	0	12,717	3,87	0	1600	11,79
178	0	12,717	3,87	0	1600	11,79
180	0	12,717	3,87	0	1600	11,79
182	0	12,726	3,87	0	1600	11,79
184	0	12,726	3,87	0	1600	11,79
186	0	12,726	3,87	0	1600	11,79
188	0	12,735	3,87	0	1600	11,79
190	0	12,735	3,861	0	1600	11,79
192	0	12,735	3,861	0	1600	11,79
194	0	12,744	3,861	0	1600	11,79
196	0	12,744	3,861	0	1600	11,79
198	0	12,744	3,861	0	1600	11,79
200	0	12,744	3,861	0	1600	11,79

### 9.3 Simulace netěsnosti v primárním a sekundárním okruhu

Čas	Množství páry	Tlak v kompenzátoru	Výška hladiny	Sprchy	Elektroohříváče	Tlak v primárním okruhu
[s]	[kg/s]	[MPa]	[m]	[°C]	[kW]	[MPa]
0	0	14,915	8,132	0	0	14,8485
5	22,61	14,915	8,132	0	0	15,2
10	104,31	14,9245	8,1605	0	0	15,675
15	202,2075	14,972	8,284	0	0	16,15
20	414,7985	15,048	8,5215	0	0	16,34
25	385,434	15,2285	9,0155	0	0	16,245
30	280,0505	15,485	9,4905	0	0	15,485
35	6,308	16,5	9,918	30	0	14,725
40	-299,6585	16,4	9,956	45	0	13,965
45	-310,2795	15,5325	9,6235	45	0	13,3
50	-229,33	15,1715	9,272	45	0	12,35
55	-387,391	14,972	9,006	30	0	12,16
60	-376,865	14,7725	8,5025	0	0	11,97
65	-367,2225	14,535	8,0085	0	230	11,78
70	-358,3685	14,3165	7,5525	0	690	11,59
75	-350,1795	14,117	7,106	0	1600	11,4
80	-223,0315	13,927	6,669	0	1600	11,21
85	-220,1245	13,813	6,3935	0	1600	11,02
90	-158,821	13,699	6,118	0	1600	10,83
95	-157,472	13,623	5,928	0	1600	10,64
100	-127,3665	13,547	5,7285	0	1600	10,45
105	-11,647	13,49	5,5765	0	1600	10,26
110	-40,4985	13,49	5,567	0	1600	10,07
115	-40,508	13,4805	5,529	0	1600	9,88
120	-40,4985	13,471	5,4815	0	1600	9,69
125	-40,4985	13,4615	5,434	0	1600	9,5
130	-15,5705	13,452	5,396	0	1600	9,31
135	10,8395	13,471	5,4245	0	1600	9,12
140	-69,217	13,4805	5,415	0	1600	8,93
145	-40,5935	13,452	5,3295	0	1600	8,74
150	-48,7255	13,4425	5,282	0	1600	8,645
155	-7,0395	13,433	5,225	0	1600	8,55
160	19,6175	13,4425	5,244	0	1600	8,455
165	-20,2825	13,4425	5,225	0	1600	8,36
170	-48,6115	13,452	5,206	0	1600	8,265
175	-48,507	13,433	5,149	0	1600	8,17
180	-7,1915	13,4235	5,092	0	1600	8,075

185	19,6555	13,433	5,1015	0	1600	7,98
190	-20,235	13,433	5,0825	0	1600	7,885
195	-48,393	13,433	5,054	0	1600	7,79
200	-48,279	13,4235	4,997	0	1600	7,695
205	0	13,414	4,94	0	1600	7,695
210	7,8755	13,4235	4,9495	0	1600	7,6
215	19,703	13,433	4,959	0	1600	7,505
220	-20,197	13,433	4,9305	0	1600	7,41
225	-55,9455	13,433	4,9115	0	1600	7,41
230	-7,4195	13,414	4,845	0	1600	7,315
235	19,7315	13,433	4,8545	0	1600	7,22
240	-7,4385	13,433	4,826	0	1600	7,125
245	46,93	13,4425	4,8355	0	1600	7,03
250	-20,14	13,4235	4,7785	0	1600	6,935
255	-7,505	13,4235	4,75	0	1600	6,84
260	19,7315	13,4425	4,7595	0	1600	6,745
265	-7,5335	13,4425	4,7405	0	1600	6,65
270	19,7125	13,452	4,75	0	1600	6,555
275	-47,9655	13,452	4,7215	0	1600	6,46
280	-3,8	13,433	4,655	0	1600	6,4125
285	23,5505	13,4425	4,6645	0	1600	6,365
290	-20,1495	13,4425	4,6265	0	1600	6,27
295	-51,566	13,4425	4,598	0	1600	6,2225
300	-51,4235	13,433	4,5315	0	1600	6,175
305	-1,957	13,4235	4,465	0	1600	6,1275
310	3,743	13,4235	4,4745	0	1600	6,08
315	19,817	13,433	4,4745	0	1600	5,985
320	-20,083	13,433	4,446	0	1600	5,89
325	-47,538	13,433	4,408	0	1600	5,795
330	-2,0045	13,4235	4,351	0	1600	5,7475
335	77,292	13,433	4,351	0	1600	5,7
340	-2,0235	13,414	4,2465	0	1600	5,6525
345	77,596	13,414	4,2465	0	1600	5,605
350	0	13,395	4,142	0	1600	5,605
355	3,648	13,4045	4,1325	0	1600	5,5575
360	22,0115	13,414	4,1325	0	1600	5,51
365	-2,0615	13,4045	4,0945	0	1600	5,4625
370	26,011	13,414	4,085	0	1600	5,4625
375	-50,654	13,414	4,047	0	1600	5,415
380	-2,09	13,4045	3,9805	0	1600	5,3675
385	10,8205	13,4045	3,971	0	1600	5,225
390	18,0785	13,414	3,971	0	1600	5,13
395	-23,4935	13,414	3,9425	0	1600	5,0825
400	-50,502	13,414	3,895	0	1600	5,035
405	-46,816	13,4045	3,8285	0	1600	4,94



410	-53,7985	13,395	3,762	0	1600	4,94
415	-2,166	13,3855	3,6765	0	1600	4,8925
420	57,361	13,3855	3,667	0	1600	4,845
425	53,9885	13,4045	3,724	0	1600	4,845
430	0	13,4235	3,7715	0	1600	4,845
435	2,1375	13,433	3,762	0	1600	4,8165
440	51,9175	13,433	3,7525	0	1600	4,7975
445	-104,0155	13,4235	3,667	0	1600	4,75
450	-106,932	13,4045	3,534	0	1600	4,75
455	-6,3365	13,376	3,3915	0	1600	4,655
460	102,277	13,3855	3,382	0	1600	4,6075
465	-49,5425	13,3665	3,2395	0	1600	4,56
470	-102,125	13,357	3,1635	0	1600	4,5125
475	-49,172	13,338	3,021	0	1600	4,465
480	-45,695	13,3285	2,945	0	1600	4,37
485	-2,3275	13,319	2,869	0	1600	4,3225
490	52,174	13,3285	2,85	0	1600	4,3225
495	-48,8395	13,319	2,7645	0	1600	4,275
500	-52,06	13,3095	2,6885	0	1600	4,275

## 10. Závěr:

Diplomová práce je rozčleněna do několika částí. V úvodu je naznačeno, proč je dobré ubírat se cestou jaderné energie.

Druhá část představuje společnost Westinghouse, popisuje projekt AP1000 s jeho inovativními prvky.

Třetí část se zabývá bezpečností projektu AP1000, která je rozdělena do dvou hlavních celků - Popis havárie tavení aktivní zóny a havárie typu LOCA. Tyto havárie jsou popsány včetně pasivních systémů a jejich aktivaci v časovém sledu.

Následně je popsán samotný kompenzátor objemu, jeho základní funkce, systémy, které zajišťuje. Je naznačen základní tepelný výpočet. Je navrhnut systém elektroohříváčů a systém sprchového zařízení.

Další část se věnuje teoretické stránce matematického modelu, díky němuž je možno znázorňovat přechodové stavy v kompenzátoru objemu, jeho popis a praktická ukázka zdrojového kódu, jež vychází z předem poskytnutého modelu, který byl již dříve řešen na katedře energetiky.

Poslední část se zabývá vybranými přechodovými stavy. V tabulkách a grafech přehledně popisuje průběh vybraných veličin v čase. I přes to, že hodnoty a grafické výstupy tohoto modelu jsou pouze obrazné, práce nám dává jasnou simulaci toho, co se v kompenzátoru objemu při přechodových dějích odehrává. Vstupní hodnoty můžeme pružně měnit.

Výpočetní část byla provedena v tabulkovém programu Microsoft Excel 2007, MATLAB 2002. Textová část v textovém editoru Microsoft Word 2007 a grafický model kompenzátoru objemu v programu Autodesk Autocad 2002.

## 11. Seznam použité literatury:

- [1] Nové jaderné zdroje. Dukovany (CZ): ČEZ, a.s., 2009
- [2] WIKIPEDIA. *George Westinghouse* [online]. 11. 4. 2012. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: [http://cs.wikipedia.org/wiki/George\\_Westinghouse](http://cs.wikipedia.org/wiki/George_Westinghouse)
- [3] WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY. *Vision & Values* [online]. 2012 [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: [http://www.westinghousenuclear.com/Our\\_Company/visions\\_values.shtm](http://www.westinghousenuclear.com/Our_Company/visions_values.shtm)
- [4] WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY, LLC. *Tisková zpráva: Westinghouse podepsal exkluzivní dohodu s českou společností Metrostav* [online]. Praha, 30. ledna, 2012. Praha [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/westinghouse-podepsal-exkluzivni-dohodu-s-ceskou-spolecnosti-metrostav.html?PHPSESSID=WM0XpC265E5WYVxofJZLIA5tl67>
- [5] WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY, LLC. [online]. [cit. 2012-05-17]. Dostupné z: <http://ap1000.westinghousenuclear.cz/>
- [6] T.L. Schulz. "Westinghouse AP1000 advanced passive plant"(web). Nuclear Engineering and Design; Volume 236, Issues 14–16, August 2006, Pages 1547–1557; 13th International Conference on Nuclear Energy, 13th International Conference on Nuclear Energy. ScienceDirect. 2008.
- [7] Adrian Bull (16 November 2010), "The AP1000 Nuclear Power Plant - Global Experience and UK Prospects" (presentation), Westinghouse UK(Nuclear Institute), 2011
- [8] AP1000®: Jednoduchý, bezpečný a moderní projekt, který vede ke snížení bezpečnostních rizik snížení bezpečnostních rizik. WESTINGHOUSE ELECTRIC COMPANY LLC. [Prezentace]. 2010. vyd. 2010 [cit. 2012-05-17].
- [9] AP1000 - Westinghouse Nuclear AP 1000 [online]. [cit. 2010-04-14]. Dostupné z: [https://www.ukap1000application.com/ap1000\\_at\\_a\\_glance.aspx](https://www.ukap1000application.com/ap1000_at_a_glance.aspx)
- [10] You can be sure ... if it's Westinghouse [online]. [cit. 2008-04-14]. Dostupné z: [www.westinghousenuclear.com/docs/AP1000\\_brochure.pdf](http://www.westinghousenuclear.com/docs/AP1000_brochure.pdf)
- [11] AP1000 - STEAM AND POWER CONVERSION [online]. [cit. 2010-05-12]. Dostupné z: [https://www.ukap1000application.com/PDFDocs/European%20DCD%20EPS-GW-GL-700%20Rev%201\\_Public/EPS-GW-GL-700%20Rev%201%20Chapter%2010/EPS-GW-GL-700-Rev%201%20Chapter%2010%20Section%2010-1.pdf](https://www.ukap1000application.com/PDFDocs/European%20DCD%20EPS-GW-GL-700%20Rev%201_Public/EPS-GW-GL-700%20Rev%201%20Chapter%2010/EPS-GW-GL-700-Rev%201%20Chapter%2010%20Section%2010-1.pdf)
- [12] CIESLAR, Stanislav. Westinghouse představil odborné veřejnosti projekt AP1000 [online]. 2010, poslední revize 23.únor 2010 [cit. 2010-04-21]. Dostupné z: <http://www.allforpower.cz/clanek/westinghouse-predstavil-odborne-verejnosti-projekt-ap1000/>

- [13] NRC: Design Certification Applications for New Reactors [online]. [cit. 2010-04-14]. Dostupné z: <<http://www.nrc.gov/reactors/new-reactors/design-cert/ap1000.html>>
- [14] AP1000 - STEAM AND POWER CONVERSION [online]. [cit. 2010-05-12]. Dostupné z: <[https://www.ukap1000application.com/PDFDocs/European%20DCD%20EPS-GW-GL-700%20Rev%201\\_Public/EPS-GW-GL-700%20Rev%201%20Chapter%2010/EPS-GW-GL-700-Rev%201%20Chapter%2010%20Section%2010-1.pdf](https://www.ukap1000application.com/PDFDocs/European%20DCD%20EPS-GW-GL-700%20Rev%201_Public/EPS-GW-GL-700%20Rev%201%20Chapter%2010/EPS-GW-GL-700-Rev%201%20Chapter%2010%20Section%2010-1.pdf)>
- [15] CUMMINS, W.E.; CORLETTI, M.M.; SCHULZ, T.L. Westinghouse AP1000 Advanced Passive Plant [online]. 2003, poslední revize 7.květen 2003 [cit. 2008-04-14]. Dostupné z: <[nuclearinfo.net/twiki/pub/Nuclearpower/WebHomeCostOfNuclearPower/AP1000Reactor.pdf](http://nuclearinfo.net/twiki/pub/Nuclearpower/WebHomeCostOfNuclearPower/AP1000Reactor.pdf)>
- [16] Matematický model systému kompenzace objemu v JE VVER 1000 (Dobrozemský, Kolát, Výzkumná zpráva, VŠB Ostrava 1983)
- [17] ZDENĚK POSPÍŠIL. *Diplomová práce: Matematický model kompenzátoru objemu a simulace provozních havarijních stavů*. 2002. vyd. Ostrava [cit. 2012-05-20].
- [18] HEJZLAR, Radko. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. Díl 1. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 385 s. ISBN 80-01-03189-6
- [19] MÁTAL, Oldřich. *Jaderné reaktory a jejich chlazení*. Nakladatelství CERN VUT v Brně. 2001. 116 s. ISBN 80-214-2028-6.
- [20] HEZOUČKÝ, František. *Základy teorie provozních režimů jaderných elektráren s tlakovodními reaktory*. Vydavatelství ČVUT v Praze, 2005. 185s. ISBN 80-01-03324-4.

## Seznam příloh:

Grafické práce:

11-FS-007-001  
11-FS-007-002  
11-FS-007-003